

**Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования**

Тульский государственный университет

КАФЕДРА ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

**Для студентов инженерно-технических
(неэлектротехнических) специальностей
заочной формы обучения**

Тула 2009

Содержание

Введение	3
Программа	4
Электрические цепи постоянного тока	4
Линейные цепи	4
Нелинейные цепи	4
Электрические цепи переменного тока	4
Цепи однофазного синусоидального тока	4
Трёхфазные цепи	5
Цепи несинусоидального тока	5
Магнитные цепи	6
Магнитные цепи с постоянной МДС	6
Магнитные цепи с переменной МДС	6
Трансформаторы и электрические машины	6
Трансформаторы	6
Машины постоянного тока	6
Асинхронные двигатели	7
Синхронные машины	7
Основы электроники	7
Электрические измерения и измерительные приборы	8
Основы электропривода	8
Общие методические указания	9
Контрольные задания, методические указания к их выполнению примеры расчета	10
Задача 1	10
Задача 2	14
Задача 3	17
Задача 4	21
Задача 5	23
Задача 6	26
Задача 7	29
Задача 8	32
Задача 9	34
Задача 10	37
Задача 11	39
Задача 12	42
Задача 13	46
Задача 14	52

Введение

Материал предназначен для студентов заочного обучения всех неэлектрических специальностей. В его состав входит программа изучения курса, общие методические указания к выполнению контрольных работ, условия задач к двум контрольным работам с методическими указаниями и примерами расчета. Методические указания к третьей контрольной, в которой рассматривается расчет полупроводниковых выпрямителей, изданы заранее и служат дополнением к данной работе. И могут быть использованы только теми студентами, которые согласно учебному плану должны выполнять три контрольных работы. Если по учебному плану должна выполняться только одна контрольная работа, то она составляется из задач (не всех) первых двух контрольных работ и оформляется как одна контрольная работа.

Материал включает контрольные работы по следующим разделам курса: электрические и магнитные цепи постоянного тока; однофазные цепи синусоидального тока; трехфазные цепи; двигатели постоянного тока параллельного возбуждения.

Методические указания и контрольные задания выдаются кафедрой каждому студенту на период выполнения контрольных работ и подлежат обязательному возврату на кафедру вместе с последней контрольной работой.

Программа

Электрическая энергия, ее особенности и области применения. Значение электрификации в научно-технической революции и создание материально-технической базы страны. Значение электротехнической подготовки для инженеров неэлектротехнических специальностей.

Электрические цепи постоянного тока

Линейные цепи. Условные обозначения элементов электрических цепей. Направления токов, напряжений и ЭДС. Единицы их измерений. Законы Ома и Кирхгофа. Цепи с одним источником питания с последовательным, параллельным и смешанным соединением резистивных элементов. Преобразование треугольника резистивных элементов в эквивалентную звезду и обратное преобразование. Разветвленная цепь с несколькими источниками ЭДС: схема цепи, расчет путем непосредственного применения законов Кирхгофа; уравнение баланса мощностей. Двухполюсники пассивные и активные: определения, условные обозначения, внутреннее (входное) сопротивление пассивного двухполюсника и способы их определения, расчет цепи методом активного двухполюсника (эквивалентного генератора).

Нелинейные цепи. Определение нелинейного элемента и цепи. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) нелинейных и линейных элементов. Методы расчета последовательной и параллельной цепей с двумя нелинейными элементами путем сложения ВАХ этих элементов. Расчет последовательной цепи, состоящего из линейного и нелинейного элементов, методом пересечения их характеристик.

Электрические цепи переменного тока

Цепи однофазного синусоидального тока. Синусоидальные электрические величины: представление синусоидальными функциями и графиками (синусоидами), мгновенные и амплитудные значения, фазы и начальные фазы. Частота, период и угловая частота синусоидальной электрической величины. Сдвиг фаз между двумя синусоидальными электрическими величинами. Действующее значение синусоидального тока, напряжения и ЭДС. Представление синусоидальных электрических величин вращающимися векторами и комплексными числами.

Одноэлементные цепи: активная, индуктивная и емкостная. Схемы цепей; уравнения мгновенных значений тока, напряжения и мощности, графики этих значений; активное, индуктивное и емкостное сопротивление; векторная диаграмма тока и напряжения; углы сдвига фаз между напряжением и током; закон Ома; формулы мощности; понятие об активной и реактивной мощности; единицы измерения этих мощностей.

Последовательная цепь с резистивным, индуктивным и емкостным элементами: схема цепи; уравнение напряжений (второй закон Кирхгофа); векторная диаграмма тока и напряжений; угол сдвига фаз между напряжением на зажимах цепи и током и его зависимость от параметров цепи; резонанс напряжений; закон Ома; активное, реактивное и полное сопротивление цепи, треугольник сопротивлений; активная, реактивная и полная мощность цепи, треугольник мощностей, единицы измерения мощности.

Цепь с параллельным соединением ветвей: схема цепи; уравнение токов (первый закон Кирхгофа); векторная диаграмма напряжений и токов; активная, реактивная и полная проводимости ветвей и всей цепи, треугольник проводимостей; угол сдвига фаз между напряжением и общим током и его зависимость от проводимостей цепи; резонанс токов; методы расчета.

Цепь со смешанным соединением ветвей: схема цепи; расчет цепи символическим методом; векторная диаграмма напряжений и токов.

Трехфазные цепи. Области применения трехфазных цепей и их преимущество перед однофазными. Простейший трехфазный генератор: устройство и принцип действия; уравнения и графики мгновенных значений, фазных ЭДС; векторная диаграмма фазных ЭДС генератора; представление векторов фазных ЭДС комплексными числами. Симметричные и несимметричные трехфазные системы электрических величин. Симметричные и несимметричные трехфазные приемники и цепи.

Четырехпроводная цепь, соединенная звездой: схема цепи; фазные линейные напряжения и токи; фазные напряжения приемника в комплексной форме; выражение векторов линейных напряжений приемника; количественное соотношение между фазным и линейным напряжениями; ток в нейтральном проводе и его выражение через фазные токи приемника; векторные диаграммы напряжений и токов для симметричного и несимметричного режимов.

Трехпроводная цепь, соединенная звездой: схема цепи; напряжение смещения нейтрали (определение, условное обозначение, расчетная формула), выражение фазных напряжений приемника через фазные напряжения источника и напряжение смещения нейтрали, векторная диаграмма напряжений и токов при несимметричном режиме работы.

Трехпроводная цепь, приемник которой соединен треугольником: схема цепи, фазные напряжения приемника в комплексной форме, выражение векторов линейных токов через фазные, векторные диаграммы напряжений и токов для симметричных и несимметричных цепей.

Мощности симметричной и несимметричной трехфазной цепей.

Цепи несинусоидального тока. Причины возникновения периодических несинусоидальных токов и напряжений. Представление периодических несинусоидальных функций рядами Фурье. Максимальное, среднее и действующее значения периодической несинусоидальной величины. Активная и полная мощности. Метод расчета линейных электрических цепей при несинусоидальном напряжении источника.

Магнитные цепи

Магнитные цепи с постоянной МДС. Устройство магнитных цепей и их разновидности. Однородная и неоднородная неразветвленные цепи. Основные величины, используемые при расчете магнитных цепей: магнитная индукция, напряженность магнитного поля, магнитная проницаемость, магнитный поток, и их взаимосвязь. Закон полного тока в интегральной форме для неразветвленной однородной и неоднородной магнитной цепи. Ферромагнитные материалы и их свойства. Кривые намагничивания ферромагнитных материалов и их использование при расчете магнитных цепей. Методы расчета неразветвленных цепей.

Магнитные цепи с переменной МДС. Особенности электромагнитных процессов в магнитных цепях переменной МДС. Магнитные потери. Вольт – амперные характеристики и индуктивное сопротивление намагничивающей обмотки при синусоидальном напряжении. Уравнение электрического состояния и векторная диаграмма намагничивающей обмотки.

Трансформаторы и электрические машины

Трансформаторы. Назначение и области применения. Однофазный трансформатор: устройство и принцип действия; коэффициент трансформации и способы его определения; схема электрической цепи и основные уравнения трансформатора; опыты холостого и короткого замыкания (определение, назначение и порядок проведения); потери энергии и КПД; изменение вторичного напряжения при нагрузке и внешняя характеристика. Трехфазный трансформатор: устройство и принцип действия; группы соединения обмоток. Автотрансформаторы: устройство, принцип действия, области применения.

Машины постоянного тока. Назначение, устройство, области применения. Принцип действия в режиме генератора и двигателя. Уравнения ЭДС якоря и электромагнитного момента. Реакция якоря. Классификация машин постоянного тока по способу возбуждения. Генераторы постоянного тока независимого, параллельного и смешанного возбуждения: схемы электрических цепей, уравнения электрического состояния цепей якоря, внешние характеристики, сущность самовозбуждения, роль остаточного намагничивания в самовозбуждении генераторов. Двигатель параллельного возбуждения: схема электрической цепи, уравнения электрического состояния цепи якоря, назначение пускового реостата и порядок пуска, естественные и искусственные механические характеристики, способы регулирования частоты вращения. Двигатель последовательного возбуждения: схема электрической цепи, естественная механическая характеристика и ее особенности, способы регулирования частоты вращения, области применения. Двигатель смешанного

возбуждения: схема электрической цепи, естественная механическая характеристика.

Асинхронные двигатели. Асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором: устройство, формула частоты вращения поля статора, принцип действия, скольжение, схема замещения, зависимость электромагнитного момента от скольжения, скольжение при холостом ходе и в начале пуска, номинальное и критическое скольжение, максимальный и пусковой моменты, механическая характеристика, пуск и регулирование частоты вращения. Асинхронный двигатель с фазным ротором: устройство, схема электрической цепи с пусковым реостатом, назначение пускового реостата, процесс пуска, естественная и искусственная механические характеристики и их использование при пуске и регулировании частоты вращения. Однофазные асинхронные двигатели с пульсирующим полем, конденсаторные, с экранированными полюсами статора.

Синхронные машины. Назначение и области применения. Устройство. Принцип действия в режиме генератора и двигателя. Механическая характеристика и способы пуска синхронного двигателя.

Основы электроники. Электропроводимость полупроводников. Образование и свойства электронно-дырочного перехода. Полупроводниковые диоды: выпрямительные (точечные и плоскостные), стабилитроны. Биполярные транзисторы: структура, условное обозначение на схемах, конструктивное устройство, движение носителей заряда в транзисторе, уравнение токов эмиттера, базы и коллектора. Включение транзистора по схеме сообщим эмиттером: схема цепи, входные и выходные характеристики, коэффициент передачи тока, рабочая область выходных характеристик. Полевые транзисторы: разновидности и условные графические обозначения, структура и схема включения, принцип действия, передаточные и выходные характеристики. Тиристоры: разновидности и условные графические обозначения, структура и вольт – амперные характеристики триодного тиристора, области применения. Интегральные микросхемы: определения, классификация по степени интеграции, полупроводниковые и гибридные микросхемы, параметры интегральных микросхем, достоинства и области применения.

Выпрямители: назначение, классификация, структурная схема. Однофазные однополупериодный и мостовой двухполупериодный выпрямители: схемы электрических цепей, принцип действия, временные диаграммы напряжения и токов, основные электрические параметры. Трехфазные выпрямители с нейтральным выводом и мостовой (схема Ларионова): схемы электрических цепей, принцип действия, временные диаграммы напряжения и токов, основные электрические параметры. Сглаживающие фильтры. Внешние характеристики выпрямителей.

Усилители: назначение, классификация и основные характеристики. Усилительный каскад с общим эмитером: схема электрической цепи, графический анализ работы, основные параметры, температурная стабилизация режима работы. Усилительные каскады на полевых транзисторах. Двухкаскадный усилитель напряжения с резистивно-емкостной связью на биполярных транзисторах: схема электрической цепи, принцип действия, коэффициент усиления, амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики. Усилители напряжения с резистивно-емкостной связью на интегральных микросхемах.

Стабилизаторы напряжения и тока.

Электрические измерения и измерительные приборы.

Погрешности в электрических измерениях. Устройство, принцип действия, основные свойства и области применения приборов магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической и выпрямительной систем. Измерение токов, напряжений, сопротивлений, мощности и энергии. Электронный осциллограф: функциональная схема, принцип действия, использование в технике.

Основы электропривода

Основы механики электропривода. Задачи выбора электродвигателя. Нагревание и охлаждение электродвигателей. Расчет мощности и выбор электродвигателя для длительного, повторно-кратковременного и кратковременного режимов работы. Электрическое торможение двигателей. Определение времени ускорения и замедления электропривода. Принципы автоматизации пуска, защиты и торможения электродвигателей.

Общие методические указания

При выполнении контрольных работ следует иметь в виду, что данных задач может несколько отличаться от решенных примеров.

Оформление контрольных работ осуществляется в ученических тетрадях в клетку, чернилами или пастой. Все чертежи и схемы выполняются с применением чертежных инструментов в соответствии с действующими ГОСТами. Сокращения и исправления в текстах не допускается. Расчеты производятся с точностью до третьей значащей цифры. Более высокая точность в большинстве расчетов не требуется.

Каждая работа выполняется в отдельной тетради, на обложке которой должны быть написаны: фамилия, имя и отчество студента, его домашний адрес, шифр(номер) учебной группы, номера личного и группового вариантов, полное наименование учебного заведения, дата выполнения контрольной работы.

Номер личного варианта представляет собой порядковый номер фамилии студента в групповом журнале.

Номер группового варианта, а также номера задач из данных методических указаний, подлежащие выполнению, указывает преподаватель, проводящий занятия в группе.

Контрольные задания, методические указания к их выполнению примеры расчета

Задача 1. Расчет линейной цепи постоянного тока методом двух законов Кирхгофа с предварительный преобразованием треугольника резисторов в эквивалентную звезду.

В цепи, схема которой приведена на рис.1, требуется: 1) преобразовать треугольник резисторов R_4, R_5, R_6 в эквивалентную звезду затем методом двух законов Кирхгофа определить токи в ветвях преобразованной цепи; 2) определить напряжения U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} и токи I_4, I_5, I_6 исходной цепи; 3) составить уравнение баланса мощностей для исходной цепи с целью проверки правильности (расхождение баланса мощностей не должно превышать 3 %). Номер схемы и числовые данные к расчету определяются по табл. 1 и 2.

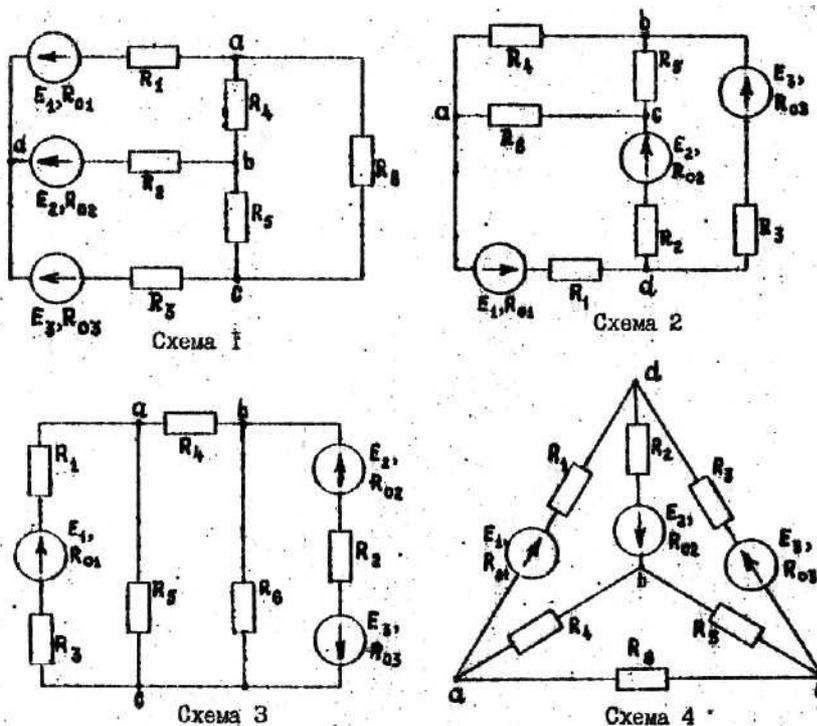


Рис. 1.

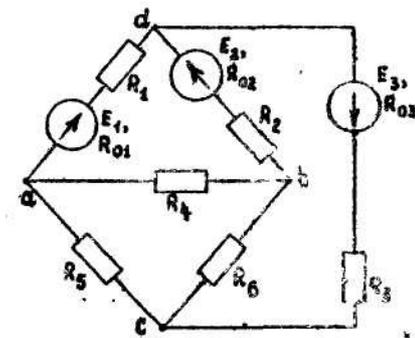


Схема 5

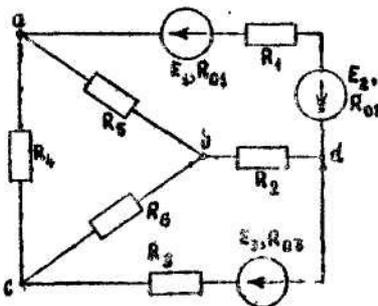


Схема 6

Рис.1 Окончание

Таблица 1

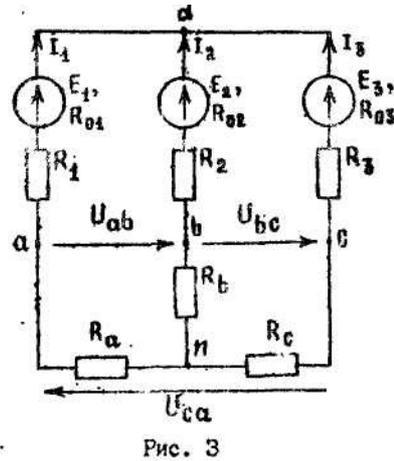
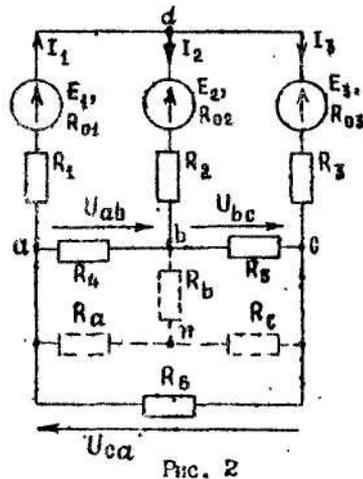
Номер личного варианта	Номер схемы	Параметры источников ЭДС					
		$E_1, В$	$R_{01}, Ом$	$E_2, В$	$R_{02}, Ом$	$E_3, В$	$R_{03}, Ом$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	24	1	36	2	48	1
2	2	48	2	24	1	36	1
3	3	36	1	48	1	24	2
4	4	24	1	36	2	48	1
5	5	48	2	24	1	36	1
6	6	36	1	48	1	24	2
7	1	24	1	48	2	36	1
8	2	48	2	36	1	24	1
9	3	36	1	24	1	48	2
10	4	24	1	48	2	36	1
11	5	48	2	36	2	24	1
12	6	36	1	24	1	48	1
13	1	20	1	40	2	30	2
14	2	50	2	25	1	40	2
15	3	48	2	36	2	24	1
16	4	36	1	48	1	24	2
17	5	36	1	48	2	24	1
18	6	48	2	24	1	36	1
19	1	40	2	30	2	20	1
20	2	25	1	50	2	40	2
21	3	48	2	36	1	24	1
22	4	48	2	36	1	24	1
23	5	24	1	48	2	36	1
24	6	40	2	30	2	20	1
25	1	30	2	48	2	20	1

Таблица 2

Номер группового варианта	Сопротивление резисторов, Ом					
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆
1	9	7	5	2	3	5
2	7	5	8	6	4	2
3	3	4	6	3	9	6
4	5	3	2	10	4	6
5	12	10	8	1	3	2

Методические указания и пример расчета

Решение данной задачи рассматривается в примере цепи, представленной на рис. 2, в которой $E_1=36$, $E_2=12$, $E_3=20$ В; $R_{01}=0,5$, $R_{02}=1$, $R_{03}=0,4$. $R_1=1$, $R_2=2$, $R_3=3$, $R_4=5$, $R_5=2$, $R_6=3$ Ом.



Замена треугольника резисторов R_4 , R_5 , R_6 эквивалентной звездой резисторов R_a , R_b , R_c осуществляется следующим образом. К узловым точкам a , b , c или к проводам, связанным с этими точками, подключается эквивалентная звезда резисторов (на рис. 2 она показана штриховыми линиями). Определяются сопротивления резисторов эквивалентной звёзды:

$$R_a = \frac{R_4 * R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{5 * 3}{5 + 2 + 3} = 1,5 \text{ Ом}$$

$$R_b = \frac{R_4 * R_5}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{5 * 2}{5 + 2 + 3} = 1 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{R_5 * R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{2 * 3}{5 + 2 + 3} = 0,6 \text{ Ом}$$

Вычерчивается схема цепи (рис. 3), получившаяся после замены треугольника резисторов эквивалентной звездой.

Токи I_1, I_2, I_3 определяется на основе преобразованной цепи в следующем порядке. На схему наносятся произвольные направления искомым токов (здесь все три тока направлены к узлу d). Задается направление обхода по контурам (оно здесь принято совпадающим с направлением движения часовой стрелки). Составляется система уравнений по законам Кирхгофа:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

$$I_1(R_a + R_1 + R_{01}) - I_2(R_{02} + R_2 + R_b) = E_1 - E_2$$

$$I_1(R_a + R_1 + R_{01}) - I_3(R_{03} + R_3 + R_c) = E_1 - E_3$$

Подставив в данную систему уравнений числовые значения и решив ее, получаем: $I_1=4 \text{ А}$; $I_2=-3 \text{ А}$; $I_3=-1 \text{ А}$. Знак минус у значений токов I_2 и I_3 означает, что их истинные направления противоположны направлениям, принятым на рис. 3, т.е. они направлены от узла d. На схеме (рис. 2) нанесены истинные направления этих токов.

Напряжения U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} определяются из решения уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа для контуров abna, bcnb, sanc: .

$$U_{ab} + I_2 R_b + I_1 R_a = 0;$$

$$U_{bc} + I_3 R_c - I_2 R_b = 0;$$

$$U_{ca} + I_1 R_a - I_3 R_c = 0;$$

Подставив в данные уравнения числовые значения и решив их, получаем: $U_{ab}=9 \text{ В}$; $U_{bc}=2,4 \text{ В}$; $U_{ca}=6,6 \text{ В}$.

Токи I_4, I_5, I_6 в исходной цепи (рис. 2) определяются по закону Ома:

$$I_4 = \frac{U_{ab}}{R_4} = \frac{-9}{5} = -1.8 \text{ А};$$

$$I_5 = \frac{U_{bc}}{R_5} = \frac{2.4}{2} = 1.2 \text{ А};$$

$$I_6 = \frac{U_{ca}}{R_6} = \frac{6.6}{3} = 2.2 \text{ А}.$$

Знак минус у значения тока I_4 означает, что этот ток направлен от узла b к узлу a.

Уравнение баланса мощностей для исходной цепи (рис.2) имеет следующий вид:

$$E_1 I_1 - E_2 I_2 - E_3 I_3 = (R_3 + R_{01}) I_1^2 + (R_2 + R_{02}) I_2^2 + \\ + (R_3 + R_{03}) I_3^2 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6$$

В данной цепи мощность первого источника положительная, так как в нем направления ЭДС и тока совпадают (режим генератора), мощности второго и третьего источников отрицательные, так как в них направления ЭДС и токов противоположны (режим приемника). Подставив в данное уравнение числовые значения и решив его, получаем $88 \text{ Вт} = 88 \text{ Вт}$. Баланс сошелся – значит, токи найдены правильно.

Задача 2. Расчет линейной цепи постоянного тока методом активного двухполюсника (эквивалентного генератора).

Методом активного двухполюсника определить ток, протекающий через один из резисторов цепи, схема которой представлена на рис. 4. Номер схемы и числовые данные к расчету приведешь в табл. 3. Наименование резистора, ток которого подлежит определению, приведено в табл. 4.

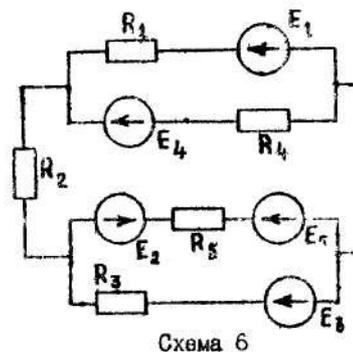
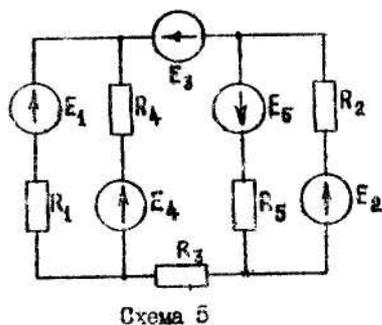
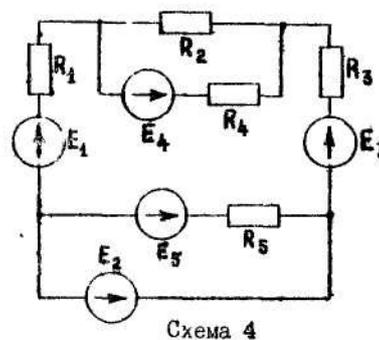
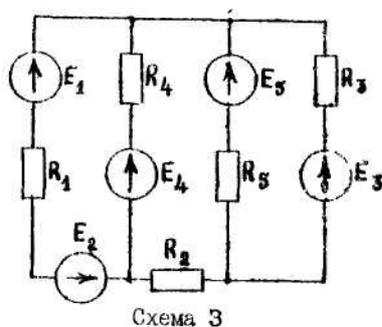
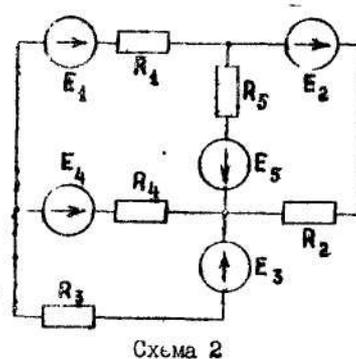
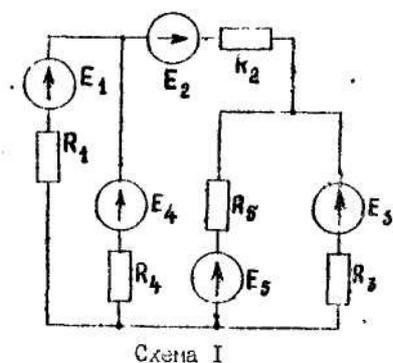


Таблица 3

Номер личного варианта	Номер схемы	Значения ЭДС, В					Сопротивления, Ом				
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	8	12	16	20	24	1	2	3	4	5
2	2	12	16	20	24	8	2	3	4	5	1
3	3	16	20	24	8	12	3	4	5	1	2
4	4	20	24	8	12	16	4	5	1	2	3
5	5	24	8	12	16	20	5	1	2	3	4
6	6	12	16	20	24	28	2	3	4	5	4
7	1	16	20	24	28	12	3	4	5	4	2
8	2	20	24	28	12	16	4	5	4	2	3
9	3	24	28	12	16	20	5	4	2	3	4
10	4	28	12	16	20	24	4	2	3	4	5
11	5	16	20	24	28	32	2	3	4	6	2
12	6	20	24	28	32	16	3	4	6	2	2
13	1	24	28	32	16	20	4	6	2	2	3
14	2	38	32	16	20	24	6	4	2	2	3
15	3	32	16	20	24	28	2	2	3	4	6
16	4	20	24	28	32	36	2	3	2	4	6
17	5	24	28	32	36	20	3	2	4	6	2
18	6	28	32	36	20	24	2	4	6	2	3
19	1	32	36	40	24	28	4	6	8	3	2
20	2	36	40	24	30	32	6	8	3	2	4
21	3	40	24	28	32	36	8	3	2	4	6
22	4	24	28	32	36	40	3	2	4	6	8
23	5	28	32	36	40	24	2	4	6	8	3
24	6	10	20	40	50	60	5	9	8	7	6
25	1	20	40	30	25	10	9	8	7	6	5

Таблица 4

Номер группового варианта	1	2	3	4	5
Резистор, в котором требуется определить ток	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅

Методические указания и пример расчета

Решение данной задачи рассматривается в примере цепи, представленной на рис. 5, в которой $E_1=8$, $E_2=4$, $E_3=E_4=4$, $E_5=9$ В; $R_1=R_2=4$, $R_3=2$, $R_4=4$, $R_5=3$, $R_6=1$ Ом. Требуется определить ток в резисторе R_5 .

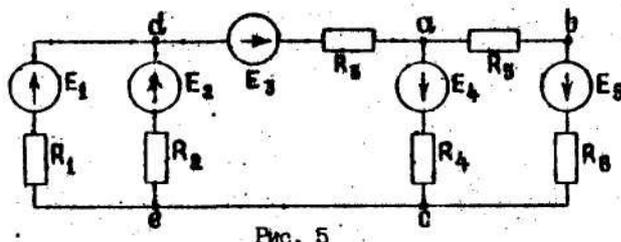


Рис. 5

Решение данной задачи осуществляется в четыре этапа: 1) заданная цепь разделяется на активный двухполюсник и его нагрузку. В данной цепи нагрузкой является резистор R_5 , а вся остальная цепь - активным двухполюсником; 2) определяется напряжение холостого хода U_x на зажимах активного двухполюсника; 3) определяется входное сопротивление $R_{вх}$ пассивной части активного двухполюсника; 4) определяется искомым ток I_5 , протекающий через резистор R_5 .

Напряжение U_x определяется в следующем порядке. Вычерчивается схема активного двухполюсника при холостом ходе (рис.6). Определяются токи холостого хода I_{1x} , I_{2x} , I_{3x} - активного двухполюсника методом двух законов Кирхгофа. Для этого составляется и решается система трех уравнений с неизвестными токами I_{1x} , I_{2x} , I_{3x} :

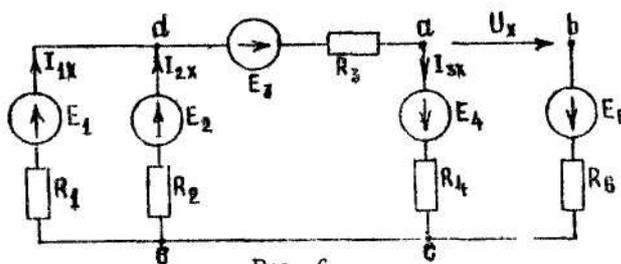


Рис. 6

$$I_{1x} + I_{2x} + I_{3x} = 0$$

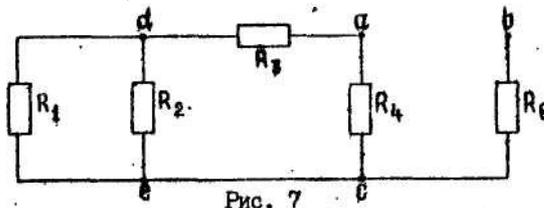
$$R_1 I_{1x} - R_2 I_{2x} = E_1 - E_2$$

$$R_1 I_{1x} - (R_3 + R_4) I_{3x} = E_1 + E_3 + E_4$$

Подставив в данную систему уравнений числовые значения и решив ее, получаем: $I_{1x}=1,125$ А; $I_{2x}=0,125$ А; $I_{3x}=1,25$ А. Определяется напряжений U_x из решения уравнения, которое составляется по второму закону Кирхгофа для контура abca:

$$U_x - I_{3x} R_4 = E_5 - E_4; U_x = 9 - 2 + 1.25 * 4 = 12 \text{ В.}$$

Сопротивление R_{BX} определяется в следующем порядке. Вычерчивается схема пассивной части активного двухполюсника (рис.7), которая получается из схемы активного двухполюсника путем исключения из нее источников ЭДС. Сопротивление R_{BX} представляет, собой



эквивалентное сопротивление цепи, схема которой приведена на рис. 7. Оно определяется в два этапа. Сначала определяется эквивалентное сопротивление $R_{ЭК1}$ части цепи, расположенной слева от узлов **a** и **c**:

$$R_{ЭК1} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 = \frac{4 * 4}{4 + 4} + 2 = 4 \text{ Ом.}$$

Затем определяется сопротивление R_{BX} :

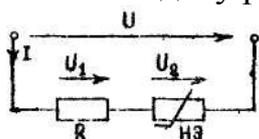
$$R_{BX} = \frac{R_{ЭК1} R_4}{R_{ЭК1} + R_4} + R_4 = \frac{4 * 4}{4 + 4} + 1 = 3 \text{ Ом.}$$

Искомый ток I_5 определяется по формуле:

$$I_5 = \frac{U_x}{R_{ЭК1} + R_4} = \frac{12}{3 + 3} = 2 \text{ А.}$$

Задача 3. Расчет последовательной нелинейной цепи постоянного тока.

В цепи, общая схема которой приведена на рис. 9, по заданному напряжению U на зажимах цепи определить ток I и напряжения U_1 и U_2 на элементах. Задачу решить методами сложения и пересечения



характеристик. Схема конкретной цепи, подлежащей расчету, получается из общей схемы путем замены в ней резистора R и нелинейного элемента $НЭ$ конкретными элементами согласно данным табл. 5. Числовые значения сопротивлений резисторов и вольт-амперных характеристик (ВАХ) нелинейных элементов приведены в табл. 6 и 7.

Таблица 5

Номер личного варианта	Последовательная цепь			Параллельная цепь		
	U, В	R	НЭ	I, А	НЭ*	НЭ**
1	2	3	4	5	6	7

1	9	R1	HЭ2	8	HЭ10	HЭ9
2	10	R1	HЭ3	10	HЭ10	HЭ8
3	11	R1	HЭ4	11	HЭ10	HЭ7
4	12	R1	HЭ5	12	HЭ10	HЭ6
5	14	R1	HЭ6	9	HЭ10	HЭ5
6	10	R2	HЭ1	8	HЭ10	HЭ4
7	11	R2	HЭ2	12	HЭ9	HЭ8
8	12	R2	HЭ3	13	HЭ9	HЭ7
9	13	R2	HЭ4	14	HЭ9	HЭ6
10	16	R2	HЭ5	11	HЭ9	HЭ5
11	17	R2	HЭ6	10	HЭ9	HЭ4
12	12	R3	HЭ1	15	HЭ8	HЭ7
13	13	R3	HЭ2	16	HЭ8	HЭ6
14	14	R3	HЭ3	13	HЭ8	HЭ5
15	15	R3	HЭ4	12	HЭ8	HЭ4
16	18	R3	HЭ5	18	HЭ7	HЭ6
17	14	R4	HЭ6	15	HЭ7	HЭ5
18	15	R4	HЭ1	14	HЭ7	HЭ4
19	16	R4	HЭ2	15	HЭ6	HЭ5
20	18	R4	HЭ3	14	HЭ6	HЭ4
21	16	R5	HЭ4	11	HЭ5	HЭ4
22	17	R5	HЭ5	8	HЭ4	HЭ3
23	19	R5	HЭ6	9	HЭ5	HЭ3
24	18	R6	HЭ1	11	HЭ6	HЭ3
25	20	R6	HЭ2	12	HЭ7	HЭ3

Таблица 6

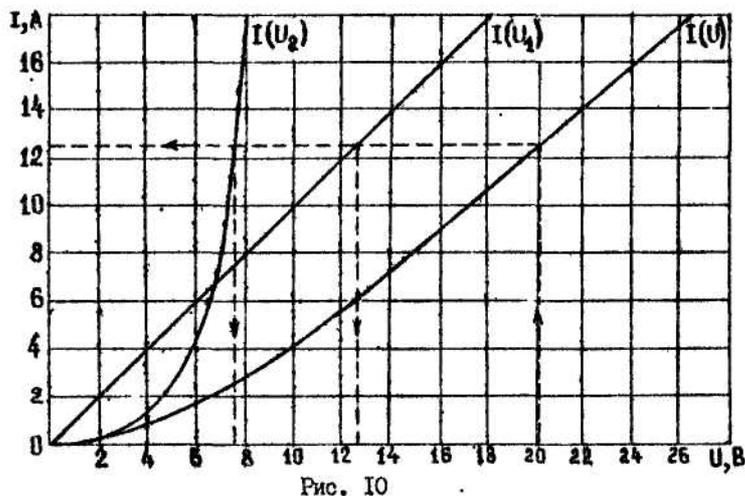
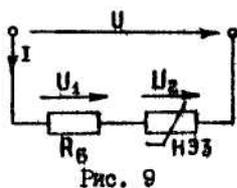
Сопротивления, Ом					
R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆
0,35	0,5	0,6	0,75	0,9	1,0

Таблица 7

Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов										
U, В	Токи, А									
	НЭ1	НЭ2	НЭ3	НЭ4	НЭ5	НЭ6	НЭ7	НЭ8	НЭ9	НЭ10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,1	0,2	0,2	2,5	4,0	6,7	0,4	3,3	2,2	1,4
2	0,2	0,7	0,5	4,2	5,9	7,8	1,5	5,6	3,8	2,1
3	4,5	1,5	0,8	4,3	6,1	8,0	9,1	6,2	4,4	2,6
4	16,0	2,7	1,3	4,3	6,2	8,1	9,4	6,8	4,9	2,9
5	-	4,3	1,8	4,4	6,2	8,1	9,5	7,2	5,2	3,2
6	-	16,0	2,7	4,4	6,3	8,2	9,5	7,4	5,4	3,4
7	-	-	4,5	4,5	6,4	8,2	9,6	7,6	5,6	3,5
8	-	-	16,0	4,8	6,4	8,3	9,6	7,7	5,7	3,6
9	-	-	-	10,0	6,7	8,4	9,7	7,7	5,7	3,7
10	-	-	-	16,0	10,0	8,4	9,7	7,8	5,7	3,7
11	-	-	-	-	16,0	9,3	9,8	7,8	5,8	3,8
12	-	-	-	-	-	16,0	9,8	7,8	5,8	3,8
13	-	-	-	-	-	-	9,8	7,9	5,9	3,8
14	-	-	-	-	-	-	9,9	7,9	5,9	3,9
15	-	-	-	-	-	-	9,9	7,9	5,9	3,9
16	-	-	-	-	-	-	10,0	8,0	6,0	4,0

Методические указания и пример расчета

Решение данной задачи рассматривается на примере цепи, приведенной на рис. 9, элементами которой являются резистор R_6 и нелинейный элемент НЭ3. Согласно табл. 6 сопротивление $R_6=1$ Ом. Напряжение $U = 20$ В.



Сущность метода сложения характеристик состоит в следующем. В осях координат U, I строятся ВАХ элементов цепи $I(U_1)$ и $I(U_2)$ и ВАХ всей цепи $I(U)$ (рис. 10).

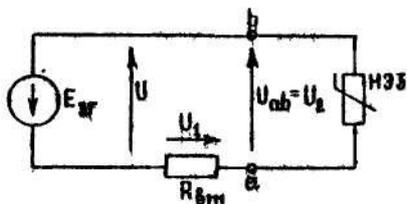
Затем, используя эти характеристики, графическим путем по заданной величине определяют искомые величины.

ВАХ резистора $I(U_1)$ представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат. Вторая, вспомогательная, точка (точка В) этой прямой определяется с помощью закона Ома. Для этого в пределах оси U задается абсцисса U_B этой точки, а затем определяется ордината I_B этой точки по закону Ома: . ВАХ нелинейного элемента $I(U_2)$ строится по значениям, приведенным в табл. 7.

Характеристика $I(U)$ строится на основе второго закона Кирхгофа: $U = U_1 + U_2$. Это уравнение в данном случае следует понимать так: для каждого фиксированного значения тока напряжение на зажимах цепи равно сумме падений напряжений на элементах цепи. А это значит, что для построения кривой $I(U)$ следует задать ряд значений тока (8 - 10 значений в пределах оси ординат) и для каждого тока найти значение напряжения U путем сложения абсцисс кривых $I(U_1)$ и $I(U_2)$. При этом на плоскости координат будет получен ряд точек, при соединении которых получится искомая кривая $I(U)$.

В рассматриваемом примере $U=20$ В. Согласно кривой $I(U)$ данному значению напряжения соответствует ток, равный 12,4 А. Согласно кривым $I(U_1)$ и $I(U_2)$ данному значению тока соответствуют следующие напряжения на элементах цепи: $U_1=12,3$ В; $U_2=7,7$ В.

Расчет данной цепи методом пересечения характеристик осуществляется следующим образом. Заданная цепь представляется состоящей из двух частей: в первую часть входят источник напряжения U и резистор R_6 , во вторую - нелинейный элемент НЭЗ. Первая часть заменяется эквивалентным генератором с параметрами: $E_{ЭГ}=U$; $R_{ВГ}=R_6$; $U_{ab}=U_2$, где $E_{ЭГ}$, $R_{ВГ}$, U_{ab} - ЭДС, внутреннее сопротивление, выходное напряжение эквивалентного генератора. Нелинейный элемент рассматривается как нагрузка эквивалентного генератора (рис. 11), Уравнение внешней характеристики, данное эквивалентного генератора, полученное на основании второго закона Кирхгофа, имеет следующий вид:



$$I = \frac{E_{ЭГ} - U_{ab}}{R_{ВГ}} = \frac{U - U_{ab}}{R_6}$$

Согласно этому уравнению в осях U, I рис. 12 строится график этой характеристики $I(U_{ab})$. Он представляет собой прямую линию, пересекающую оси координат в точках М и N. Координаты точки М определяются из опыта холостого хода, а точки N из опыта короткого замыкания эквивалентного генератора. При холостом ходе $I=0$, а $U_{ab}=U=20$ В. Из этого следует, что абсцисса точки М равна 80, а ордината - нулю. При опыте

короткого замыкания $U_{ab}=0$, а $I = \frac{U}{R_6} = 20 \text{ А}$. Из этого следует, что абсцисса точки N равна нулю, а ордината - 20.

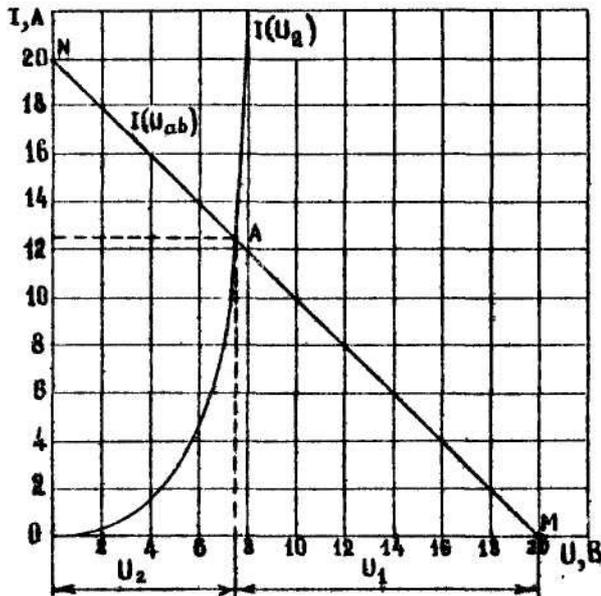


Рис. 12

В этих же осях координат строится ВАХ нелинейного элемента по значениям, приведенным в табл. 7.

Искомые ток I и напряжения U_1 и U_2 определяются точкой пересечения прямой $I(U_{ab})$ и кривой $I(U_2)$ (точкой А). Ордината этой точки равна искомому току, а ее абсцисса разделяет отрезок OM на две части. Одна часть численно равна U_1 , а другая U_2 (рис. 12).

Задача 4. Расчет параллельной нелинейной цепи постоянного тока.

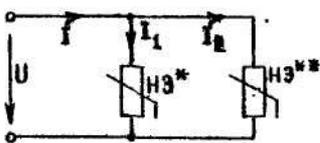


Рис. 13

В цепи, общая схема которой приведена на рис. 13, по заданному значению тока I определить напряжение U и токи I_1 , I_2 в ветвях цепи. Схема конкретной цепи, подлежащая расчету, получается из общей схемы (рис. 13) путем замены в ней нелинейных элементов $НЭ^*$ и $НЭ^{**}$ конкретными нелинейными элементами согласно данным табл. 5. Числовые значения ВАХ нелинейных элементов приведены в табл. 7.

Методические указания и пример расчета

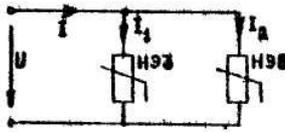


Рис. 14

Решение данной задачи рассматривается на примере цепи с нелинейными элементами НЭЗ и НЭВ, схема которой приведена на рис. 14. Ток $I=12$ А. Данная задача решается следующим образом.

В осях координат U, I строятся ВАХ нелинейных элементов $I(U_1)$ и $I(U_2)$, согласно данным табл. 7 и ВАХ всей цепи $I(U_1)$ (рис.16). Характеристика $I(U)$ строится на основе первого закона Кирхгофа: $I=I_1+I_2$. В данном случае это уравнения следует понимать так: для каждого фиксированного, значения напряжения U значение общего тока I равно сумме токов в ветвях. А это значит, что для построения кривой $I(U)$ следует задать ряд значений напряжения U (8 - 10 значений в пределах оси абсцисс) и для каждого значения напряжения найти значение общего тока I путем сложения ординат характеристик $I(U_1)$ и $I(U_2)$.

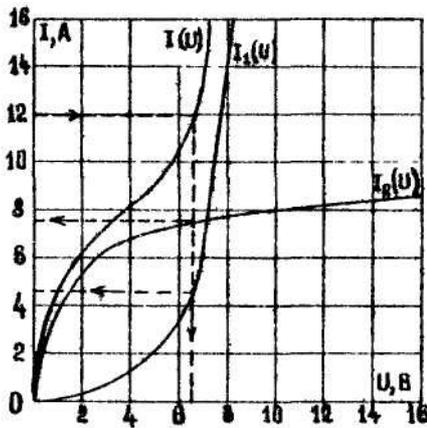


Рис. 15

При этом на плоскости координат будет получено множество точек, при соединении которых получится кривая $I(U)$.

В рассматриваемом примере $I=12$ А. Согласно кривой $I(U)$ данному значению тока соответствует напряжение $U=6,6$ В. Согласно кривым $I(U_1)$ и $I(U_2)$ данному значению напряжения соответствуют следующие значения токов в ветвях цепи: $I_1=4,5$ А; $I_2=7,5$ А.

Задача 5. Расчет неразветвленной неоднородной магнитной цепи с постоянной магнитодвижущей силой.

В цепи, эскиз которой приведен на рис. 16, по заданному значению магнитной индукции в воздушном зазоре B_0 определить магнитный поток и магнитодвижущую силу (МДС). Размеры магнитопровода приведены в табл. 8. Наименования ферромагнитных материалов, из которых изготовлен магнитопровод, и заданное значение B_0 приведены в табл. 9, Числовые значения кривых намагничивания ферромагнитных материалов приведены в табл. 10.

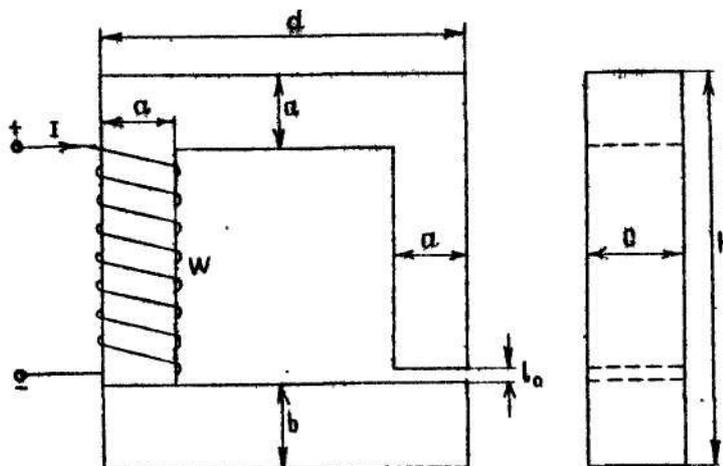


Рис. 16

Таблица 8

Номер личного варианта	Размеры магнитопровода, мм					
	a	b	c	d	h	l_0
1	2	3	4	5	6	7
1	32	36	30	160	160	1.30
2	36	42	40	140	160	1.30
3	40	36	36	160	180	1.20
4	36	32	40	160	180	1.15
5	34	40	30	160	180	1.15
6	32	36	30	140	200	1.15
7	38	48	40	140	220	1.10
8	40	40	40	160	160	1.30
9	36	40	30	140	160	1.40
10	48	40	40	180	200	1.00
11	42	50	42	200	180	0.95
12	30	32	30	120	140	1.40
13	32	30	30	120	180	1.25
14	34	40	36	120	160	1.40
15	42	36	40	180	200	0.90
16	48	48	38	200	200	0.70
17	36	40	40	160	220	0.50
18	42	50	50	160	240	0.40

19	48	48	48	200	260	0.30
20	42	48	40	200	280	0.20
21	20	24	24	100	140	1.45
22	28	34	30	100	140	1.50
23	26	32	40	100	140	1.45
24	30	36	30	120	120	1.50
25	30	30	30	120	100	1.55

Таблица 9

Номер группового варианта	Материал		В ₀ , Тл
	Верхней П-образной части магнитопровода	нижней части магнитопровода	
1	Эл.техн. сталь Э310	Пермаллой	1,5
2	Пермаллой	Эл.техн. сталь Э42	1,4
3	Эл.техн. сталь Э42	Литая сталь	1,3
4	Литая сталь	Чугун	0,65
5	Пермендюр	Эл.техн. сталь Э310	1,6

Таблица 10

Напряженность магнитного поля, А/м	Магнитная индукция, Тл					
	Чугун	Литая сталь	Эл.техн. сталь Э310	Эл.техн. сталь Э42	Пермаллой 50НП	Пермендюр
1	2	3	4	5	6	7
50	0,03	0,12	0,50	0,28	0,95	0,50
100	0,06	0,22	1,00	0,43	1,00	1,00
150	0,08	0,33	1,22	0,61	1,15	1,42
200	0,11	0,43	1,25	0,70	1,21	1,60
300	0,16	0,60	1,33	0,85	1,27	1,84
400	0,20	0,72	1,37	0,96	1,31	1,95
600	0,27	0,90	1,44	1,12	1,37	2,08
1000	0,38	1,10	1,52	1,25	1,46	2,20
2000	0,56	1,33	1,60	1,38	1,55	2,31
3000	0,65	1,45	1,66	1,44	1,60	2,33
4000	0,70	1,53	1,71	1,49	1,65	2,36
5000	0,73	1,60	1,77	1,55	1,70	2,43
6000	0,75	1,61	1,82	1,60	1,75	2,45

Методические указания и пример расчета

Решение данной задачи рассматривается при следующих исходных данных: $a=40$, $b=50$, $c=30$, $d=160$, $h=180$, $l_0=1,2$ мм; материал верхней П-образной части магнитопровода - пермендюр, нижней - эл.техн. сталь Э310; $B_0=1,6$ Тл.

Расчет данной цепи производится следующим образом.

Вычерчивается магнитопровод цепи (рис.17) с учетом его размеров.

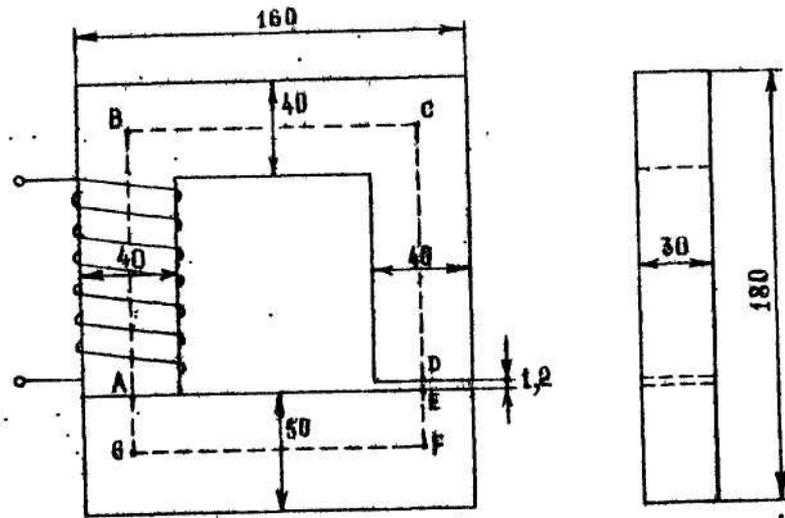


Рис. 17

Рис. 17

Определяются длины верхнего l_B и нижнего l_H участков магнитопровода (по средней линии магнитопровода):

$$l_B = AB + BC + CD = (110 + 120 + 110) * 10^{-3} = 340 * 10^{-3} \text{ м};$$

$$l_H = EF + FG + GA = (25 + 120 + 25) * 10^{-3} = 170 * 10^{-3} \text{ м}.$$

Определяются поперечные сечения верхнего S_B и нижнего S_H участков магнитопровода:

$$S_B = ac = 40 * 30 * 10^{-6} = 1,2 * 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$S_H = bc = 50 * 30 * 10^{-6} = 1,5 * 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Поперечное сечение воздушного зазора S_0 принимается равным поперечному сечению верхней части магнитопровода.

Определяется магнитный поток:

$$\Phi = B_0 * S_0 = 1,6 * 1,2 * 10^{-3} = 1,92 * 10^{-3} \text{ Вб}.$$

Определяется магнитная индукция в нижней части магнитопровода:

$$B_H = \frac{\Phi}{S_H} = \frac{1,92 * 10^{-3}}{1,5 * 10^{-3}} = 1,28 \text{ Тл}.$$

Определяется напряженность магнитного поля в воздушном зазоре:

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{1,6}{4 * \pi * 10^{-7}} = 1272 * 10^3 \text{ A/м.}$$

Строятся кривые намагничивания (рис.18) ферромагнитных материалов, из которых изготовлен магнитопровод.

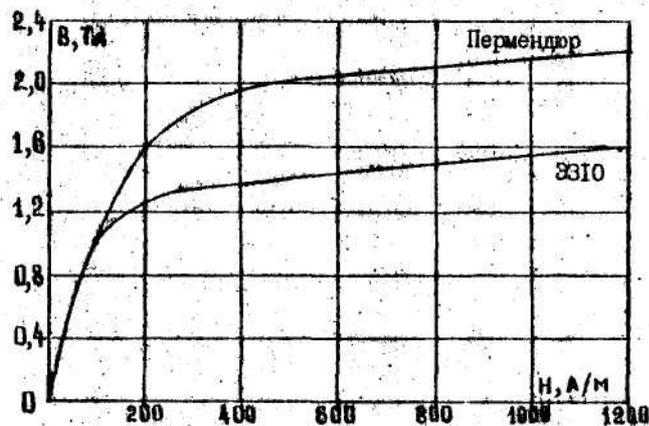


Рис. 18

По кривым намагничивания определяются напряженности магнитного поля в верхней и нижней частях магнитопровода. В результате получается: $H_B=200 \text{ A/м}$; $H_H=230 \text{ A/м}$.

По закону полного тока определяется магнитодвижущая сила цепи:

$$I * w = H_B * l_B + H_H * l_H + H_0 * l_0 = 200 * 340 * 10^{-3} + 230 * 170 * 10^{-3} + 1272 * 10^3 * 1,2 * 10^{-3} = 1633$$

Задача 6. Расчет последовательной цепи синусоидального тока.

В цепи, схема которой приведена на рис. 19, требуется:

1. Определить: действующее I и амплитудное I_m значения тока; действующие значения напряжений на элементах цепи U_R , U_L , U_C ; действующее U и амплитудное U_m значения напряжения на зажимах цепи; угловую частоту ω ; угол сдвига фаз между напряжением и током ϕ ; начальную фазу напряжения на зажимах цепи ψ_u ; мощности элементов цепи P , Q_L , Q_C ; полную S и реактивную Q мощности цепи; коэффициент мощности цепи $\cos\phi$. Одна из этих величин может оказаться заданной.

2. Составить уравнения мгновенных значений тока $i(\omega t)$ и напряжения $u(\omega t)$ и построить синусоиды, соответствующие этим уравнениям.

3. Построить векторную диаграмму тока \underline{I} и напряжений \underline{U}_R , \underline{U}_L , \underline{U}_C и треугольник мощностей. Исходные данные к расчету приведены в табл. 11 и 12. Частота $f=50 \text{ Гц}$.

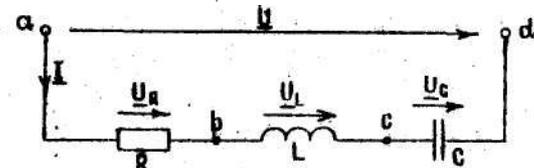


Рис. 19

Таблица 11

Номер личного варианта	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	Ψ_i , град	Номер личного варианта	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	Ψ_i , град
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	9,6	796	0	14	3	15,9	1061	70
2	2	12,7	1061	10	15	4	6,4	531	-30
3	2	9,6	531	-90	16	4	6,4	637	80
4	3	12,7	1592	20	17	4	19,1	1592	-20
5	2	19,1	1061	-80	18	4	15,9	1592	90
6	3	6,4	796	30	19	4	9,6	637	-10
7	3	19,1	1592	-70	20	4	15,9	1061	15
8	2	6,4	796	40	21	4	9,6	455	-45
9	3	6,4	531	-60	22	4	9,6	531	25
10	2	12,7	1592	50	23	4	15,9	455	-35
11	2	12,7	531	-50	24	4	19,1	1061	35
12	2	9,6	637	60	25	4	22,3	637	25
13	2	19,1	796	-40					

Таблица 12

Номер группового варианта	1	2	3	4	5
Дано	U=12 В	S=100 В*А	Q=72 вар	U _{ac} =10 В	U _{bc} =4 В

Методические указания и пример расчета

Решение данной задачи рассматривается при следующих исходных данных: R=3 Ом; L=15,9 мГн; C=455 мкФ; $\Psi_i=15^\circ$; Q=72 вар.

Расчет данной цепи осуществляется в следующем порядке.

Определяются индуктивное X_L , емкостное X_C , реактивное X и полное Z сопротивления цепи: $X_L = 2 * \pi * f * L = 2 * 3.14 * 50 * 15.9 * 10^{-3} = 5 \text{ Ом}$;

$$X_C = \frac{1}{2 * \pi * f * C} = \frac{1}{2 * 3.14 * 50 * 455 * 10^{-6}} = 7 \text{ Ом};$$

$$X = X_L - X_C = 5 - 7 = -2 \text{ Ом};$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{3^2 - (-2)^2} = 3.6 \text{ Ом}.$$

Определяются действующие и амплитудные значения тока и общего напряжения: $I = \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt{|X|}} = \frac{\sqrt{72}}{\sqrt{|-2|}} = 6 \text{ А}$;

$$I_m = \sqrt{2} * I = 4.41 * 6 = 8.48 \text{ Ом}; U = Z * I = 3.6 * 6 = 21.6 \text{ В};$$

$$U_m = \sqrt{2} * U = 1.41 * 21.6 = 30.5 \text{ А}.$$

Определяются действующие значения напряжений на резистивном, индуктивном и емкостном элементах цепи: $U_R = I * R = 3 * 6 = 18 \text{ В};$

$$U_L = I * X_L = 5 * 6 = 30 \text{ В};$$

$$U_C = I * X_C = 7 * 6 = 42 \text{ В}.$$

Определяется мощность резистивного, индуктивного и емкостного элементов и полная мощность цепи:

$$P = I^2 R = 6^2 * 3 = 108 \text{ Вт};$$

$$Q_L = X_L I^2 = 5 * 6^2 = 180 \text{ вар}; Q_C = X_C I^2 = 7 * 6^2 = 252 \text{ вар};$$

$$S = UI = 21.6 * 6 = 129.6 \text{ В*А}.$$

Определяются угловая частота ω , угол сдвига фаз между напряжением и током φ , начальная фаза общего напряжения ψ_u и коэффициент мощности цепи $\cos\varphi$:

$$\omega = 2\pi f = 6.28 * 50 = 314 \text{ рад/с};$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{X}{R}\right) = \arctg\left(\frac{-2}{3}\right) = -34^\circ; \psi_u = \varphi + \psi_i = -34 + 15 = -19^\circ;$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{108}{129.6} = 0.833.$$

Составляются уравнения мгновенных значений тока $i(\omega t)$ и общего напряжения $u(\omega t)$:

$$i(\omega t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = 8.48 \sin(314t + 15) \text{ А};$$

$$u(\omega t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = 30.5 \sin(314t - 19) \text{ В}.$$

Строятся временная (синусоидальная) диаграмма мгновенных значений тока и напряжения (рис.20), векторная диаграмма тока и напряжений (рис.21) и треугольник мощностей (рис.22).

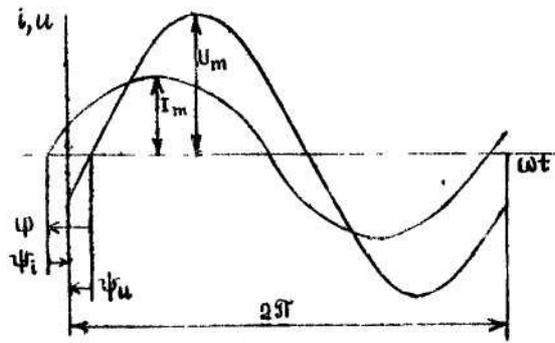


Рис. 20

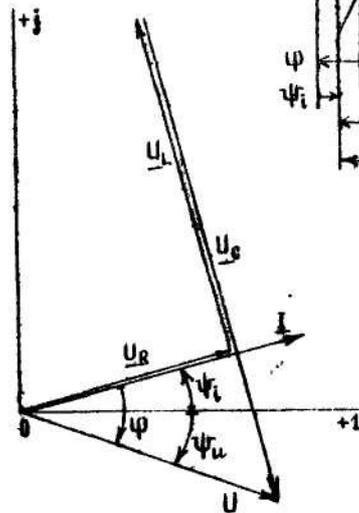


Рис. 21

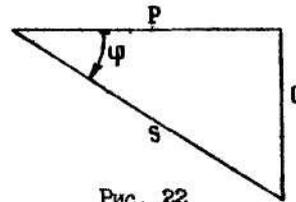


Рис. 22

В данном примере рассмотрено решение задачи, относящейся к третьему групповому варианту. При решении задач, относящихся к остальным групповым вариантам, действующие значения токов определяются по формулам: для первого группового варианта $I = \frac{U}{Z}$, для второго $I = \sqrt{\frac{S}{Z}}$, для четвертого $I = \frac{U_{ac}}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$, для пятого $I = \frac{U_{bc}}{X_L}$.

Задача 7. Расчет параллельной цепи синусоидального тока.

Определить токи и построить векторную диаграмму напряжения и токов цепи, общая схема которой приведена на рис. 23. Данная схема соответствует первому групповому варианту. Схемы для остальных групповых вариантов получаются путем исключения из общей схемы одного из элементов согласно табл.12. Исходные данные к расчету приведены в табл. 14.

Таблица 13

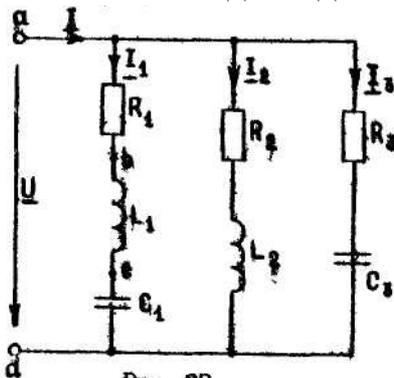


Рис. 23

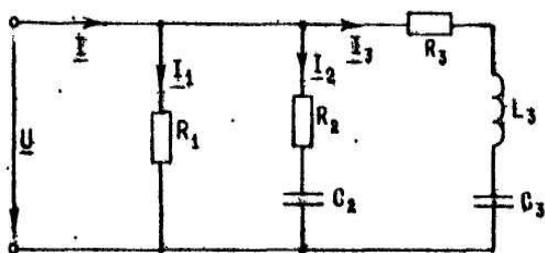
Номер группового варианта	Элемент, исключаемый из общей схемы
1	-
2	L_2
3	R_2
4	R_3
5	C_3

Таблица 14

Номер личного варианта	Одна из заданных величин	Сопротивления, Ом						
		R_1	X_{L1}	X_{C1}	R_2	X_{L2}	R_3	X_{C3}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$U = 20 \text{ В}$	3	6	2	8	6	5	5
2	$U_{ab} = 40 \text{ В}$	8	4	10	10	20	15	10
3	$U_{bc} = 50 \text{ В}$	12	10	5	24	19	21	24
4	$U_{cd} = 36 \text{ В}$	9	6	18	10	15	10	10
5	$U_{ac} = 45 \text{ В}$	5	10	5	6	8	12	7
6	$U_{bd} = 21 \text{ В}$	4	3	10	4	6	8	6
7	$P_1 = 200 \text{ Вт}$	8	8	4	9	5	15	9
8	$Q_{L1} = 8 \text{ вар}$	9	2	10	4	3	8	8
9	$Q_{C1} = 136 \text{ вар}$	15	15	7	15	20	10	15
10	$Q_1 = 600 \text{ вар}$	10	5	20	9	6	12	4
11	$S_1 = 320 \text{ В*А}$	12	20	4	8	16	20	10
12	$U = 35 \text{ В}$	5	5	10	5	7	15	8
13	$U_{ab} = 42 \text{ В}$	7	5	12	12	15	10	10
14	$U_{bc} = 80 \text{ В}$	10	20	10	8	7	15	20
15	$U_{cd} = 30 \text{ В}$	20	25	10	15	15	10	20
16	$U_{ac} = 36 \text{ В}$	4	6	3	5	5	7	4
17	$U_{bd} = 32 \text{ В}$	6	2	10	10	8	16	12
18	$P_1 = 180 \text{ Вт}$	5	20	8	10	15	13	13
19	$Q_{L1} = 150 \text{ вар}$	12	6	15	15	10	20	20
20	$Q_{C1} = 40 \text{ вар}$	5	15	10	7	7	4	8
21	$Q_1 = 144 \text{ вар}$	7	6	10	3	8	4	6
22	$S_1 = 225 \text{ В*А}$	4	10	2	9	5	15	10
23	$U = 72 \text{ В}$	8	6	15	18	24	12	18
24	$U_{ab} = 86 \text{ В}$	8	20	5	12	16	15	10
25	$U_{bc} = 70 \text{ В}$	15	10	20	25	25	12	16

Методические указания и пример расчета

Решение данной задачи рассматривается на примере цепи, представленной на рис. 24, при следующих исходных данных: $U=180 \text{ В}$; $R_1=20$; $R_2=6$; $X_{C2}=8$; $R_3=10$; $X_{L3}=30$; $X_{C3}=15 \text{ Ом}$.



Расчет данной цепи осуществляется символическим методом в следующем порядке.

Составляются комплексные сопротивления ветвей цепи: $\underline{Z}_1 = R_1 = 20 \text{ Ом}$;

$$\underline{Z}_2 = R_2 - jX_{C2} = 6 - j8 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 + j(X_{L3} - X_{C3}) = 10 + j(30 - 15) = 10 + j15 \text{ Ом}.$$

Начальная фаза напряжения ψ_u принимается равной нулю. Поэтому $U = U = 180 \text{ В}$.

Определяются комплексные и действующие значения токов в ветвях цепи:

$$\underline{I}_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{180}{20} = 9 \text{ А}; I_1 = 9 \text{ А};$$

$$\underline{I}_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{180}{6 - j8} = \frac{180(6 + j8)}{(6 - j8)(6 + j8)} = \frac{180(6 + j8)}{36 + 64} = 10.8 + j14.4 \text{ А};$$

$$I_2 = \sqrt{10.8^2 + 14.4^2} = 18 \text{ А}; \quad \underline{I}_3 = \frac{U}{Z_3} = \frac{180}{10 + j15} = 5.53 + j8.3 \text{ А};$$

$$I_3 = \sqrt{5.53^2 + 8.3^2} = 10 \text{ А}.$$

Определяются комплексное и действующее значения общего тока:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 9 + 10.8 + j14.4 + 5.53 - j8.3 = 25.33 + j6.1 \text{ А};$$

$$I = \sqrt{25.33^2 + 6.1^2} = 26 \text{ А}.$$

Определяются начальные фазы токов по формуле:

$$\psi_{ik} = \arctg\left(\frac{I_k''}{I_k'}\right), \text{ где } I_k' \text{ и } I_k'' \text{ вещественная часть, и числовое значение}$$

мнимой части комплексного числа, определяющего k-й комплексный ток.

$$\text{Начальная фаза общего тока } \psi_i = \arctg\left(\frac{I''}{I'}\right) = \arctg\left(\frac{6.1}{25.33}\right) = 13^\circ.$$

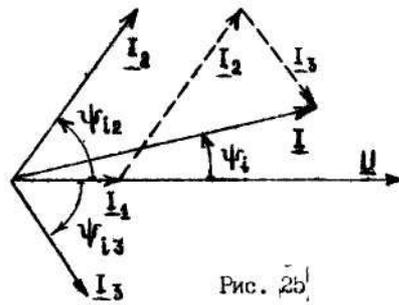
Начальные фазы токов в ветвях:

$$\psi_{i1} = \arctg\left(\frac{I_1''}{I_1'}\right) = \arctg\left(\frac{0}{9}\right) = 0^\circ;$$

$$\psi_{i2} = \arctg\left(\frac{I_2''}{I_2'}\right) = \arctg\left(\frac{14.4}{10.8}\right) = 53^\circ;$$

$$\psi_{i3} = \arctg\left(\frac{I_3''}{I_3'}\right) = \arctg\left(\frac{-8.3}{5.53}\right) = -56^\circ.$$

Строится векторная диаграмма напряжения и токов (рис. 25).



Задача 8. Расчет смешанной цепи синусоидального тока.

Пользуясь общей схемой цепи (рис.26) и данными табл. 15, составить схему цепи, подлежащую расчету. В составленной цепи определить токи I_1 , I_2 , I_3 , напряжение на зажимах U , напряжения на ветвях U_{ab} , U_{bc} и напряжения на элементах цепи. (Одна из этих величин известна, т.е. задана в качестве исходной данной в табл. 15.). Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

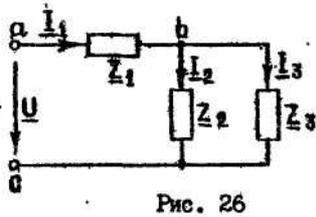


Таблица 15

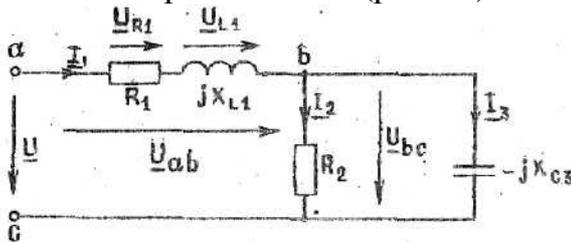
Номер личного варианта	Комплексные соединения ветвей цепи, Ом			Номера групповых вариантов и исходные данные к ним				
				1	2	3	4	5
	U, В	I_1 , А	U_{ab} , В	I_2 , А	U_{bc} , В			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-j2.4	4	2 + j2	12	5	9,6	8	8
2	2 + j10	5	-j10	20	3	24,0	4	20
3	-j2.8	4	4 + j4	12	3	5,6	2	10
4	2 + j14	10	-j20	28	2	25,0	4	36
5	-j3.6	6	3 + j3	10	2	7,2	3	6
6	4 + j24	15	-j30	46	2,5	48,0	4	40
7	-j4.8	6	6 + j6	20	3	9,6	2	15
8	6 + j20	20	-j40	50	4	41,0	3	54
9	-j5.4	8	4 + j4	24	4	5,4	2,5	18
10	6 + j25	25	-j50	60	3	52,0	6	45
11	-j6.6	8	8 + j8	28	3	13,2	2	20
12	3 + j25	30	-j60	90	2	100,0	2	130
13	-j5	10	5 + j5	20	4	15,0	3	18
14	12 + j23	35	-j70	82	5	127,0	4	127
15	-j10	10	10 + j10	30	3,6	40,0	2,4	24
16	8 + j25	40	-j80	127	4	110,0	3	72

17	-j6	12	6 + j6	24	5	30,0	1,5	16
18	6 + j10	10	-j5	30	2	48,0	2	15
19	-j10	12	12 + j12	36	2,4	30,0	2	18
20	6 + j18	20	-j10	42	3	56,0	1	18
21	-j11	15	10 + j10	40	2	44,0	4	20
22	10 + j30	30	-j15	60	1,5	64,0	2	27
23	-j11	15	15 + j15	48	3	22,0	2	30
24	14 + j28	40	-j20	100	2	36,0	1,5	36
25	-j7.2	18	9 + j9	30	4	21,6	1,5	24

Методические указания и пример расчета

Решение данной задачи рассматривается при следующих исходных данных: $Z_1 = 24 + j41 \text{ Ом}$; $Z_2 = 80 \text{ Ом}$; $Z_3 = -j40 \text{ Ом}$; $I_1 = 3 \text{ А}$ и осуществляется в следующем порядке.

Составляется подлежащая расчету схема цепи с учетом заданных комплексных сопротивлений (рис.27).



Определяется комплексное сопротивление разветвленной части цепи:

$$\underline{Z}_{23} = \frac{\underline{Z}_2 * \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{80(-j40)}{80 - j40} = \frac{-j80}{2 - j} = \frac{\sqrt{80(2 + j)}}{(2 + j)(2 - j)} = 16 - j32 \text{ Ом.}$$

Определяется комплексное сопротивление всей цепи:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23} = 24 + j41 + 16 - j32 = 40 + j9 \text{ Ом.}$$

Начальная фаза тока первой ветви Ψ_{i1} принимается равной нулю, поэтому $\underline{I}_1 = I_1 = 3 \text{ А}$.

Определяются комплексные и действующие значения напряжений на зажимах цепи и на ветвях цепи:

$$\underline{U} = \underline{Z} * \underline{I}_1 = (40 + j9)3 = 120 + j27 \text{ В}; U = \sqrt{120^2 + 27^2} = 123 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{ab} = \underline{Z}_1 * \underline{I}_1 = (24 + j41)3 = 72 + j123 \text{ В}; U = \sqrt{72^2 + 123^2} = 142 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{Z}_{23} * \underline{I}_1 = (16 - j24)3 = 48 - j96 \text{ В}; U = \sqrt{48^2 + 96^2} = 107 \text{ В.}$$

Определяются комплексные и действующие значения токов во второй и третьей ветвях:

$$\underline{I}_2 = \frac{U_{bc}}{Z_2} = \frac{48 - j96}{80} = 0.6 - j1.2 \text{ A}; \quad I_2 = \sqrt{0.6^2 + 1.2^2} = 1.34 \text{ A};$$

$$\underline{I}_3 = \frac{U_{bc}}{Z_3} = \frac{48 - j96}{-j40} = 2.4 - j1.2 \text{ A}; \quad I_3 = \sqrt{2.4^2 + 1.2^2} = 2.68 \text{ A}.$$

Определяются комплексные и действующее значения напряжений на элементах цепи:

$$\underline{U}_{R1} = R_1 * \underline{I}_1 = 24 * 3 = 72 \text{ В}; \quad \underline{U}_{L1} = jX_{L1} * \underline{I}_1 = j41 * 3 = j123 \text{ В}.$$

Определяются начальные фазы напряжений и токов, которые необходимы для построения векторной диаграммы:

$$\Psi_u = \arctg\left(\frac{27}{120}\right) = 13^\circ; \quad \Psi_{uab} = \arctg\left(\frac{123}{72}\right) = 59^\circ; \quad \Psi_{ubc} = \arctg\left(\frac{-96}{42}\right) = -63^\circ;$$

$$\Psi_{uR1} = \Psi_{i1} = 0^\circ, \quad \text{так как } U_{R1} \text{ совпадает по фазе с } I_1;$$

$$\Psi_{uL1} = \Psi_{i1} + 90 = 90^\circ, \quad \text{так как } U_{L1} \text{ опережает } I_1 \text{ на } 90^\circ;$$

$$\Psi_{i2} = \Psi_{ubc} = -63^\circ, \quad \text{так как } I_2 \text{ совпадает по фазе с } U_{bc};$$

$$\Psi_{i3} = \Psi_{ubc} + 90 = 27^\circ, \quad \text{так как } I_3 \text{ опережает } U_{bc} \text{ на } 90^\circ.$$

Строится векторная диаграмма напряжений и токов (рис.28)

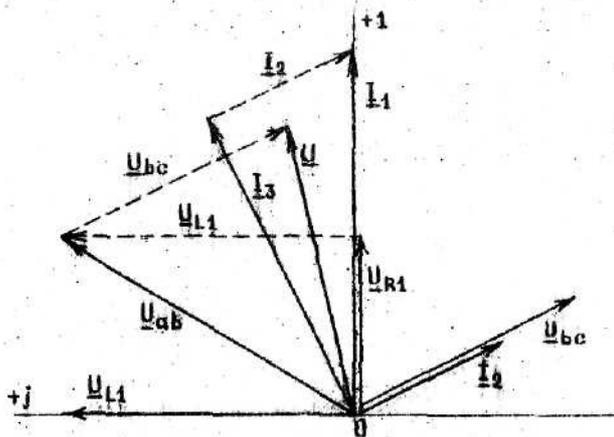


Рис. 28

Задача 9. Расчет трехфазной четырехпроводной цепи, соединенной звездой.

Комплексные сопротивления фаз приемника $\underline{Z}_a = R_1 + j(X_{L1} - X_{C1})$; $\underline{Z}_b = R_2 + j(X_{L2} - X_{C2})$; $\underline{Z}_c = R_3 + j(X_{L3} - X_{C3})$. Числовые значения $R_1, X_{L1}, \dots, X_{C3}$ даны в табл. 16. Значение линейного напряжения U_L сети, к которой подключен приемник, приведено в табл. 17. Сопротивление нейтрального провода принимается равным нулю.

Начертить схему цепи и показать на ней условно положительные направления линейных и фазных напряжений, линейных токов, в тока в нейтральном проводе. (Элементы цепи, сопротивления которых равны нулю, на схеме не показывать).

Определить линейные, токи I_a, I_b, I_c и ток в нейтральном проводе I_n ; комплексные мощности фаз приемника S_a, S_b, S_c всех трех фаз S ; углы сдвига фаз между фазными напряжениями и токами $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$.

Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Таблица 16

Номер личного варианта	Сопротивления, Ом								
	R_1	X_{L1}	X_{C1}	R_2	X_{L2}	X_{C2}	R_3	X_{L3}	X_{C3}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3	8	4	4	3	4	0	18	6
2	4	7	4	4	3	0	10	6	6
3	3	8	4	3	4	0	0	12	2
4	4	7	4	4	3	0	0	5	15
5	6	4	12	6	0	8	9	12	0
6	8	4	10	8	0	8	15	8	8
7	6	4	12	6	0	8	0	25	10
8	8	4	10	8	0	6	10	10	25
9	4	6	9	4	7	4	12	0	16
10	4	9	12	4	4	7	20	25	5
11	4	12	9	4	7	4	0	28	8
12	4	9	12	4	4	7	10	10	20
13	9	17	5	9	12	0	8	10	16
14	12	14	5	12	9	0	10	10	10
15	9	17	5	9	12	0	0	15	5
16	12	14	5	12	9	0	0	6	16
17	12	6	12	10	26	16	16	12	0
18	16	6	6	18	16	10	22	20	8
19	12	6	22	12	10	26	0	28	8
20	16	6	18	16	10	22	0	12	32
21	15	25	5	15	20	0	21	10	28
22	20	20	15	20	15	0	35	10	10
23	15	25	5	15	20	0	0	45	10
24	20	20	15	20	15	0	0	10	45
25	18	4	28	18	0	24	24	32	0

Таблица 17

Номер группового варианта	1	2	3	4	5
Линейное напряжение сети, В	660	380	220	690	400

Методические указания и пример расчета

Решение данной задачи рассматривается при следующих исходных данных: $U_{\text{л}}=380$ В, $R_1=11$, $X_{L1}=19$, $X_{C2}=44$, $R_3=22$ Ом; сопротивления X_{C1} , R_2 , X_{L2} , X_{L3} , X_{C3} равны нулю. Это решение осуществляется в следующем порядке.

Составляется подлежащая расчету схема цепи с учетом исходных данных (рис.29).

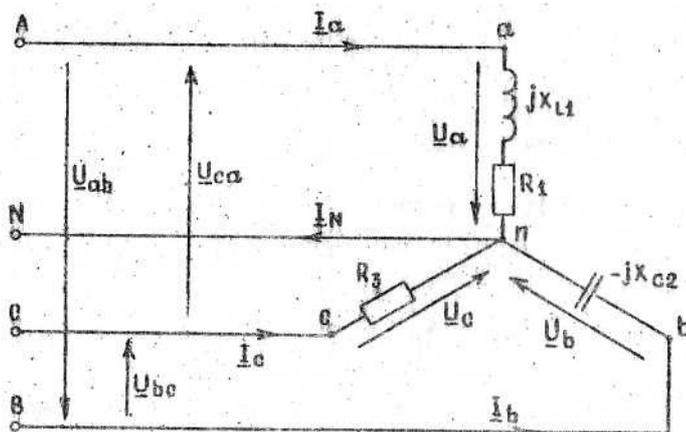


Рис. 29

Определяется действующее значение фазного напряжения приемника:

$$U = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} = 220 \text{ В.}$$

Составляется симметричная система фазных комплексных напряжений приемника:

$$\underline{U}_a = U_{\phi} = 220 \text{ В;}$$

$$\underline{U}_b = U_{\phi} * e^{-j120} = 220 * e^{-j120} = -110 - j190 \text{ В;}$$

$$\underline{U}_c = U_{\phi} * e^{j120} = 220 * e^{j120} = -110 + j190 \text{ В;}$$

Составляются комплексные сопротивления фаз приемника:

$$\underline{Z}_a = R_1 + jX_{L1} = 11 + j19 \text{ Ом;}$$

$$\underline{Z}_b = -jX_{C2} = -j44 \text{ Ом;}$$

$$\underline{Z}_c = R_3 = 22 \text{ Ом.}$$

Определяются комплексные и действующие значения линейных токов и тока в нейтральном проводе:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{220}{11 + j19} = 5 - j8,6 \text{ А; } \underline{I}_2 = \sqrt{5^2 + 8,6^2} = 10 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{-110 - j190}{-j44} = 4,3 - j2,5 \text{ А; } \underline{I}_2 = \sqrt{4,3^2 + 2,5^2} = 5 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_c = \frac{U_c}{Z_c} = \frac{-110 + j190}{22} = -5 + j8.6 \text{ A}; \quad \underline{I}_2 = \sqrt{5^2 + 8.6^2} = 10 \text{ A.}$$

$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 5 - j8.6 + 4.3 - j2.5 - 5 + j8.6 = 4.3 - j2.5 \text{ A};$$

$$\underline{I}_N = 5 \text{ A}; \quad (\text{В данной цепи ток } \underline{I}_N \text{ случайно оказался равным току } \underline{I}_b)$$

Определяются углы сдвига фаз между фазными напряжениями и токами:

$$\varphi_a = \arctg\left(\frac{X_{L1}}{R_1}\right) = \arctg\left(\frac{19}{11}\right) = 60^\circ; \quad \varphi_k = -90, \text{ так как приемник фазы } b$$

емкостный, $\varphi_c = 0$, так как приемник фазы «с» резистивный.

Определяются комплексные мощности фаз и всей цепи:

$$\underline{S}_a = \underline{U}_a \underline{I}_a^* = 220(5 - j8.6) = 1100 + j1900 \text{ В*А};$$

$$\underline{S}_b = \underline{U}_b \underline{I}_b^* = (-110 - j190)(4.3 + j2.5) = -j1100 \text{ В*А};$$

$$\underline{S}_c = \underline{U}_c \underline{I}_c^* = (-110 - j190)(-5 + j8.6) = 2200 \text{ В*А};$$

$$\underline{S} = \underline{S}_a + \underline{S}_b + \underline{S}_c = 1100 + j1900 - j1100 + 2200 = 3300 + j800 \text{ В*А.}$$

Строится векторная диаграмма напряжений и токов (рис. 30).

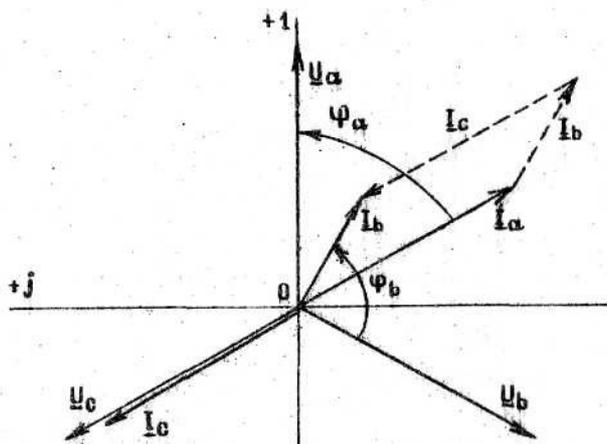


Рис. 30

Задача 10. Расчет трехфазной, соединенной треугольником.

Комплексные сопротивления фаз приемника определяются выражениями:
 $\underline{Z}_{ab} = R_1 + j(X_{L1} - X_{C1}); \quad \underline{Z}_{bc} = R_2 + j(X_{L2} - X_{C2}); \quad \underline{Z}_{ca} = R_3 + j(X_{L3} - X_{C3}).$

Числовые значения $R_1, X_{L1}, \dots, X_{C3}$ даны в табл. 16. Значение линейного напряжения сети $U_{Л}$, к которой подключен приемник, приведено в табл. 17

Начертить схему цепи и показать на ней условно положительные направления линейных напряжений, линейных и фазных токов. (Элементы цепи, сопротивления которых равны нулю, на схеме не показывать).

Определить: фазные I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} и линейные I_a, I_b, I_c ; токи углы сдвига фаз между фазными напряжениями и токами $\varphi_{ab}, \varphi_{bc}, \varphi_{ca}$.

Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Методические указания и пример расчета

Решение данной задачи рассматривается при следующих исходных данных: $U_{\text{Л}}=380$ В, $R_1=22$, $X_{C2}=10$, $X_{L3}=33$ Ом; сопротивления X_{L1} , X_{C1} , R_2 , X_{L2} , R_3 , X_{C3} равны нулю. Это решение осуществляется в следующем порядке.

Составляется подлежащая расчету схема цепи с учетом исходных данных (рис. 31).

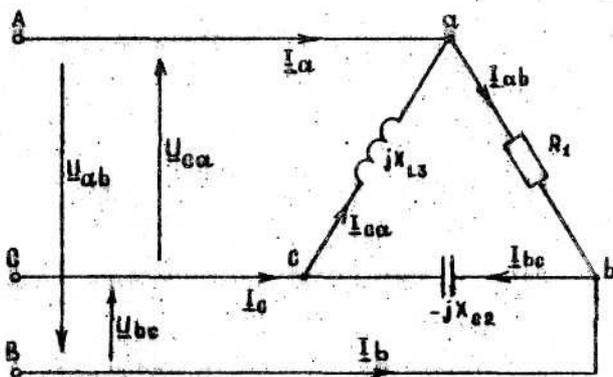


Рис. 31

Составляется симметричная система фазных комплексных напряжений приемника:

$$\underline{U}_{ab} = U_{\text{Л}} - 660 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{bc} = U_{\text{Л}} e^{-j120} = 660 e^{-j120} = -330 - j570 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{ca} = U_{\text{Л}} e^{j120} = 660 e^{j120} = -330 + j570 \text{ В}.$$

Составляются комплексные сопротивления фаз приемника:

$$\underline{Z}_{ab} = R_1 = 22 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{bc} = -jX_{C2} = -j10 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{ca} = jX_{L3} = j33 \text{ Ом}.$$

Определяются комплексные и действующие значения фазных и линейных ТОКОВ:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{660}{22} = 30 \text{ А}; \quad I_{ab} = 30 \text{ А};$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{-330 - j570}{-j10} = 57 - j33 \text{ А}; \quad I_{bc} = \sqrt{57^2 + 33^2} = 66 \text{ А};$$

$$\underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} = \frac{-330 + j570}{j33} = 17.3 + j10 \text{ А}; \quad I_{ca} = \sqrt{17.3^2 + 10^2} = 20 \text{ А};$$

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 30 - 17.3 - j10 = 12.7 - j10 \text{ А}; \quad I_a = 16 \text{ А};$$

$$\underline{I}_b = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = 57 - j33 - 30 = 27 - j33 \text{ А}; \quad I_b = 43 \text{ А};$$

$$\underline{I}_c = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = 17.3 + j10 - 57 + j33 = -39.7 + j43 \text{ А}; \quad I_c = 59 \text{ А}.$$

Определяются углы сдвига фаз между фазными напряжениями и токами:
 $\varphi_{ab} = 0^\circ$; $\varphi_{bc} = -90^\circ$; $\varphi_{ca} = 90^\circ$, так как приемник фазы резистивный, фазы bc - емкостный, фазы ca - индуктивный.

Определяются комплексные мощности фаз и всей цепи:

$$\underline{S}_{ab} = \underline{U}_{ab} I_{ab}^* = 660 * 30 = 19800 \text{ В*А};$$

$$\underline{S}_{bc} = \underline{U}_{bc} I_{bc}^* = (-330 - j570)(57 + j33) = -j43380 \text{ В*А};$$

$$\underline{S}_{ca} = \underline{U}_{ca} I_{ca}^* = (-330 - j570)(17.3 - j10) = j13200 \text{ В*А};$$

$$\underline{S} = \underline{S}_{ab} + \underline{S}_{bc} + \underline{S}_{ca} = 19800 - j43380 + j13200 = 19800 - j30180 \text{ В*А}.$$

Строится векторная диаграмма напряжений и токов (рис. 32).

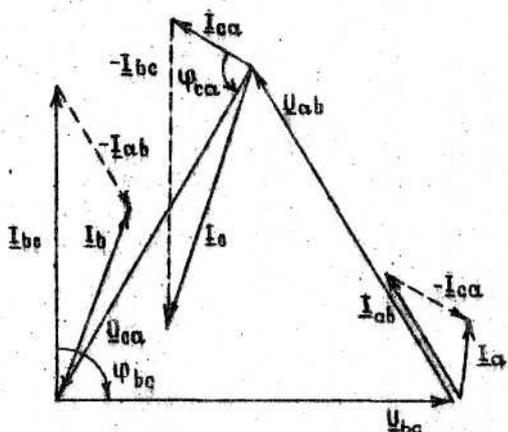


Рис. 32

Задача 11. Расчет характеристик трехфазного трансформатора.

Исходные данные к расчету приведены в табл. 18 и 19. Этими данными являются номинальная мощность $S_{ном}$; номинальные первичное и вторичное напряжения $U_{1ном}$, $U_{2ном}$; мощности потерь при опыте холостого хода P_x и при опыте короткого замыкания P_k ; угол сдвига фаз φ_2 между фазным напряжением и током вторичной обмотки; коэффициент нагрузки β ; напряжение короткого замыкания U_k процентах от $U_{1ном}$; группа соединения обмоток трансформатора.

Требуется: начертить схему электрической цепи нагруженного трансформатора; определить коэффициенты трансформации фазных и линейных напряжений и значения фазных и линейных номинальных токов; рассчитать и построить внешнюю характеристику трансформатора и зависимость коэффициента полезного действия трансформатора от коэффициента нагрузки β . При этом принять $\beta = 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2$.

Таблица 18

Номер личного варианта	$S_{ном}, \text{кВ*А}$	$U_{1ном}, \text{кВ}$	$U_{2ном}, \text{В}$	$P_x, \text{кВт}$	$P_k, \text{кВт}$	$\varphi_2, \text{град}$

1	25	10	380	0,3	1	0
2	40	15	380	0,4	1	10
3	63	10	380	0,6	2	20
4	63	20	660	0,7	2	30
5	100	10	660	1,0	3	40
6	100	35	660	0,9	3	-10
7	160	10	3000	1,5	4	-20
8	160	35	3000	1,6	5	-30
9	250	10	230	2,5	5	-40
10	250	35	380	2,4	6	15
11	400	10	660	4,0	12	-15
12	400	35	3150	3,8	11	25
13	630	10	230	6,3	20	-25
14	630	35	400	6,0	18	35
15	1000	10	690	10,0	30	-35
16	1000	35	3150	9,0	30	37
17	1600	10	330	16,0	50	-37
18	1600	35	690	15,0	45	26
19	2500	10	6300	25,0	75	-26
20	2500	35	3300	24,0	60	18
21	4000	10	6600	40,0	100	-18
22	4000	35	6600	38,0	100	24
23	6300	10	380	63,0	200	28
24	6300	35	400	60,0	150	32
25	9000	35	6000	100,0	250	38

Таблица 19

Номер группового варианта	1	2	3	4	5
$U_k, \%$	8	9	10	7	6
Группы соединения обмоток	Y/Y - 0	Y/ Δ - 11	Y/Y - 0	Y/ Δ - 11	Y/Y - 0

Методические указания и пример расчета

Решение данной задачи рассматривается при следующих исходных данных: $S_{\text{ном}}=630 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $U_{1\text{ном}}=10 \text{ кВ}$; $U_{2\text{ном}}=400 \text{ В}$; $P_x=1,8 \text{ кВт}$; $P_k=8,4 \text{ кВт}$; $U_k=5\%$; $\varphi_2=37^\circ$; группа соединения обмоток Y/Y – 6. Это решение, осуществляется в следующем порядке.

Составляется схема электрической цепи нагруженного трансформатора (рис.33).

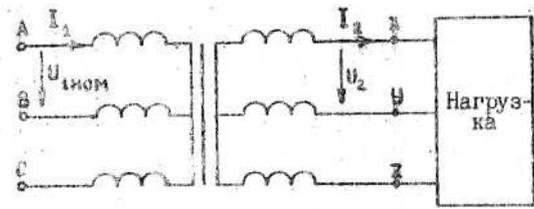


Рис. 33

Определяется коэффициент трансформации. Так как обе обмотки соединены звездой, то линейный n_L и фазный n_Φ коэффициенты трансформаций равны: $n_L = n_\Phi = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} = \frac{10000}{400} = 25$.

Определяются фазные номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток:

$$U_{1\text{ф.НОМ}} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} = \frac{10000}{1,73} = 5780 \text{ В}; \quad U_{2\text{ф.НОМ}} = \frac{U_{2\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{1,73} = 231 \text{ В}.$$

Определяются значения номинальной мощности и мощностей потерь при опытах холостого хода и короткого замыкания, приходящиеся на одну фазу:

$$S_{\text{ф.НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{3} = \frac{630}{3} = 210 \text{ кВ*А};$$

$$P_{\text{хф}} = \frac{P_{\text{х}}}{3} = 0,6 \text{ кВт}; \quad P_{\text{кф}} = \frac{P_{\text{к}}}{3} = \frac{8,4}{3} = 2,8 \text{ кВт};$$

Определяются номинальные токи первичной и вторичной обмоток. Так как обмотки соединены звездой то линейный и фазный токи равны:

$$I_{1\text{НОМ}} = I_{1\text{ф.НОМ}} = \frac{S_{\text{ф.НОМ}}}{U_{1\text{ф.НОМ}}} = \frac{210000}{5780} = 36 \text{ А};$$

$$I_{2\text{НОМ}} = I_{2\text{ф.НОМ}} = \frac{S_{\text{ф.НОМ}}}{U_{2\text{ф.НОМ}}} = \frac{210000}{231} = 909 \text{ А}.$$

Определяется внешняя характеристика трансформатора, представляющая зависимость вторичного напряжения U_2 от тока нагрузки I_2 или от величины β , которая пропорциональна току нагрузки ($\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{НОМ}}}$). Зависимость определяется

в следующем порядке. Определяются активная $U_{\text{ак}}$ и реактивная $U_{\text{рк}}$ составляющие напряжения короткого замыкания в процентах от $U_{1\text{ф.НОМ}}$:

$$u_{\text{ак}} = \frac{P_{\text{кф}}}{S_{\text{ф.НОМ}}} 100 = \frac{2800}{210000} 100 = 1,33;$$

$$u_{\text{рк}} = \sqrt{u_{\text{к}}^2 - u_{\text{ак}}^2} = \sqrt{5^2 - 1,33^2} = 4,8.$$

Определяется зависимость относительного изменения вторичного напряжения ΔU_2 от коэффициента нагрузки β по формуле $\Delta U_2 = \beta(U_{\text{ак}} \cos \varphi_2 + U_{\text{рк}} \sin \varphi_2)$. При $\beta=0,6$ и $\varphi_2=37^\circ$ получаем: $\Delta U_2 = 0,6(1,33 * 0,8 + 4,8 * 0,6) = 2,38$. Значения ΔU_2 для остальных значений β приведены в табл.20.

Определяется зависимость $U_2(\beta)$ по формуле $U_2(\beta) = U_{2\text{ном}} \left(1 - \frac{\Delta U_2}{100} \right)$.

При $\beta=0,8$ получаем $U_2(\beta) = 400 \left(1 - \frac{2,36}{100} \right) = 390 \text{ В}$. Значения $U_2(\beta)$ для остальных значений β приведены в табл. 20.

Определяется зависимость коэффициента полезного действия трансформатора от коэффициента нагрузки β по формуле:

$$\eta(\beta) = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi + P_x + \beta^2 P_k}$$

При $\beta=0,6$ получаем

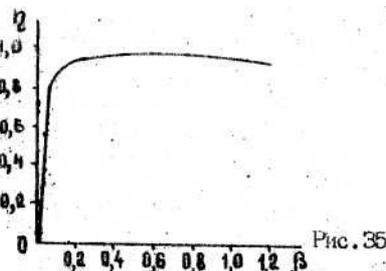
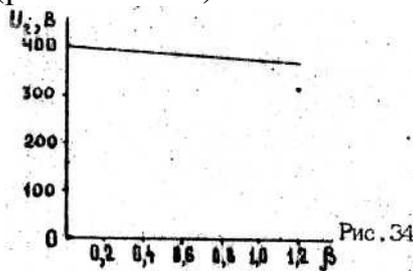
$$\eta(\beta) = \frac{0,6 * 630 * 0,8}{0,6 * 630 * 0,8 + 1,8 + 0,6^2 * 8,4} = 0,984$$

Значения $\eta(\beta)$ для остальных значений β приведены в табл. 20.

Таблица 20

β	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$\Delta U_2, \%$	0	0,39	0,78	1,56	2,36	3,15	3,94	4,73
$U_2(\beta), \text{В}$	400	398	396	393	390	387	384	381
$\eta(\beta)$	0	0,964	0,979	0,984	0,983	0,982	0,980	0,977

На основании данных табл. 20 строятся графики зависимостей $U_2(\beta)$ и $\eta(\beta)$ (рис. 34 и 35).



Задача 12. Расчет характеристик асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Исходные данные к расчету приведены в табл. 21 и 22, Этими данными являются: номинальная мощность двигателя $P_{\text{ном}}$, номинальная, частота вращения ротора $n_{\text{ном}}$, номинальный коэффициент полезного действия $\eta_{\text{ном}}$, номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ном}}$, кратность максимального момента $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$, кратность пускового тока $I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$, номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, число пар полюсов обмотки статора p , схема соединения обмоток статора. Двигатель получает электроэнергию от сети с частотой напряжения 50 Гц.

Требуется: определить номинальную мощность, потребляемую двигателем от сети, номинальный и пусковой токи статора, номинальное к критическое скольжения, номинальный, максимальный и пусковой моменты; рассчитать и построить зависимость момента от скольжения и механическую характеристику; начертить схему подключения двигателя к сети посредством магнитного пускателя, обеспечивающего двигателю реверсирование, максимальную и тепловую защиту.

Таблица 21

Номер личного варианта	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos\varphi_{\text{ном}}$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	p
1	2	3	4	5	6	7	8
1	17	2900	88	0,88	2,2	7	1
2	22	2900	89	0,88	2,2	7	1
3	30	2900	90	0,90	2,2	7	1
4	40	2900	89	0,90	2,2	7	1
5	55	2900	91	0,90	2,2	7	1
6	75	2900	92	0,90	2,2	7	1
7	100	2920	91	0,89	2,2	7	1
8	13	1450	87	0,87	2,0	7	2
9	17	1460	88	0,88	2,0	7	2
10	22	1470	89	0,89	2,0	6	2
11	30	1460	87	0,86	1,8	6	2
12	40	1455	88	0,88	1,9	7	2
13	55	1460	89	0,90	2,1	6	2
14	75	1470	90	0,89	2,0	7	2
15	10	965	88	0,86	1,8	6	3
16	13	970	87	0,86	1,8	5,5	3
17	17	975	88	0,87	1,9	6	3
18	22	965	89	0,87	1,8	7	3
19	30	970	90	0,88	1,7	6,5	3
20	40	965	91	0,89	1,8	7	3
21	55	980	92	0,89	1,9	6,5	3
22	8	725	85	0,78	1,7	6	4
23	10	730	86	0,79	1,6	7	4
24	13	725	87	0,82	1,7	6,6	4
25	17	730	88	0,82	1,6	6	4

Таблица 22

Номер группового варианта	1	2	3	4	5
Схема соединения обмоток статора					
Номинальное напряжение, В	380	220	660	220	127

Методические указания и пример расчета

Решение данной задачи рассматривается при следующих исходных данных: $P_{\text{НОМ}}=40$ кВт, $n_{\text{НОМ}}=730$ об/мин, $\eta_{\text{НОМ}}=0,91$, $\cos\varphi_{\text{НОМ}}=0,83$, $M_{\text{max}}/M_{\text{НОМ}}=1,8$, $I_{\text{п}}/I_{\text{НОМ}}=6$, $U_{\text{НОМ}}=220$ В, $p=4$; обмотка статора соединена в треугольник. Это решение осуществляется в следующем порядке.

Определяется номинальная мощность, потребляемая двигателем:

$$P_{\text{IНОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{40}{0,91} = 44 \text{ кВт};$$

Определяются номинальный и пусковой токи:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{IНОМ}}}{(\sqrt{3}U_{\text{НОМ}} \cos\varphi_{\text{НОМ}})} = \frac{44000}{(1,73 * 220 * 0,83)} = 139 \text{ А};$$

$$I_{\text{п}} = 6I_{\text{НОМ}} = 6 * 139 = 836 \text{ А}.$$

Определяются частота вращения поля статора n_1 , номинальное $s_{\text{НОМ}}$ и критическое $s_{\text{кр}}$ скольжения:

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 * 50}{4} = 750 \text{ об/мин};$$

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{(n_1 - n_{\text{НОМ}})}{n_1} = \frac{(750 - 730)}{750} = 0,027 \text{ или } 2,7\% ;$$

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{НОМ}} \left(\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}} + \sqrt{\left(\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}} \right)^2 - 1} \right) = 0,027 \left(1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 0,09 \text{ или } 9\%.$$

Определяются номинальный и максимальный моменты на валу двигателя:

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{9550P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{9550 * 40}{720} = 530 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\max} = 1.8M_{\text{ном}} = 1,8 * 530 = 954 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Зависимость момента от скольжения $M(s)$ и механическая характеристика $n(M)$ рассчитываются в следующем порядке. Для заданного ряда значений s (он приведен в табл.23) определяются значения частоты вращения ротора n и момента на валу M по формулам:

$$n = n_1(1 - s); \quad M = \frac{2M_{\max}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}.$$

При $s=0,2$ получаем: $n = 750(1 - 0.2) = 800$ об/мин;

$$M = \frac{2 * 954}{\frac{0.2}{0.09} + \frac{0.09}{0.2}} = 715 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Значения n и M для остальных значений s приведены в табл. 23.

Таблица 23

s	0	0,027	0,09	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$n_{\text{ном}}$, об/мин	750	730	682	600	450	300	150	0
M, Н•м	0	530	954	715	409	279	212	170

Первая графа этой таблицы соответствует холостому ходу двигателя, при котором момент на валу $M_x = 0$, скольжение $s_x = 0$, частота вращения ротора $n_x \approx n_1 = 750$ об/мин. Вторая и третья графы соответствуют номинальному и критическому скольжениям, Последняя графа соответствует началу пуска двигателя. Из нее следует, что пусковой момент двигателя $M_{\text{п}} = 170$ Н•м.

По данным табл. 23 строятся графики зависимостей $M(s)$ и $n(M)$ (рис. 36 и 37).

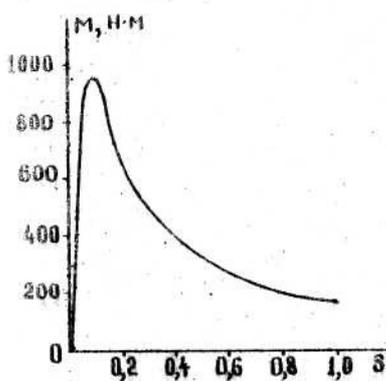


Рис. 36

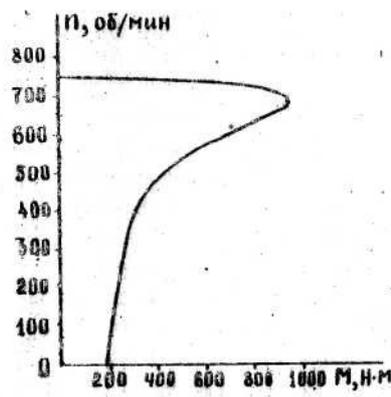


Рис. 37

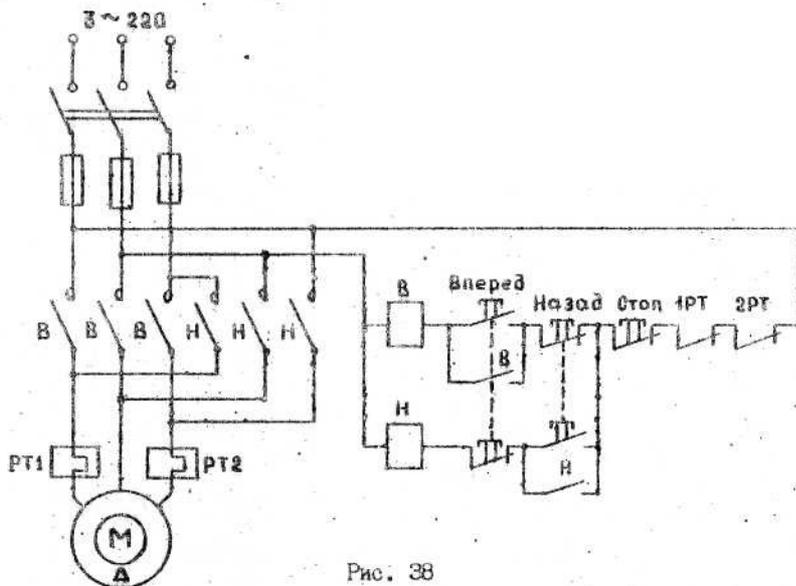


Рис. 38

Схема подключения двигателя к сети приведена на рис. 38.

Задача 13. Расчет характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором.

Рассчитать и построить зависимости момента от скольжения (характеристики $M(s)$), указанные в табл. 24. Схема электрической цепи двигателя приведена на рис. 39. Исходные данные к расчету даны в табл. 25 и 26. Знак "X" в табл. 24 означает, что данный контакт замкнут. При расчете пользоваться упрощенной схемой замещения. Активное сопротивление обмотки статора R_1 при расчете принять равным нулю. Двигатель работает от сети частотой 50 Гц. Критическое скольжение характеристики $M(s)_1$ должно равняться единице: $s_{кр1} = 1$. Критическое скольжение $s_{кр2}$ характеристики $M(s)_2$ должно равняться среднему арифметическому от $s_{кр}$ и $s_{кр1}$, где $s_{кр}$ - критическое скольжение, относящееся к естественной характеристике. Обмотка ротора соединена звездой.

Определить значения пусковых моментов и токов, которые будет иметь двигатель на каждой характеристике, и значения сопротивлений пусковых резисторов $R_{П1}$ и $R_{П2}$.

Используя графики $M(s)_1$ и $M(s)_2$, определить скольжения $s_{ном1}$ и $s_{ном2}$ частоты вращения $n_{ном1}$ и $n_{ном2}$, токи статора $I_{ном1}$ и $I_{ном2}$ при моменте вращения ка валу, равном номинальному.

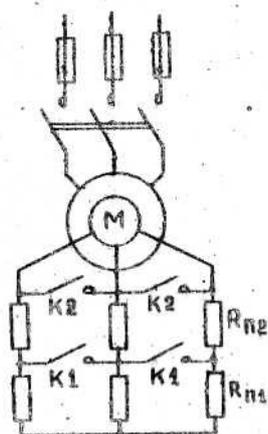


Рис. 39

Таблица 24

K1	K2	Условное обозначение и наименование характеристик
X	X	M(s) - естественная характеристика
		M(s) ₁ - первая искусственная характеристика
X		M(s) ₂ - вторая искусственная характеристика

Таблица 25

Номер личного варианта	Схема соединения обмоток статора	p	Номинальные значения					$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$
			U, В	P, кВт	η	cos ϕ	U ₂ , В	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Y	3	380	21	0,86	0,83	114	3,2
2	Δ	3	220	28	0,88	0,82	147	3,4
3	Y	4	380	15	0,84	0,75	101	2,8
4	Δ	4	220	22	0,85	0,74	138	3,0
5	Y	3	380	38	0,89	0,83	171	3,2
6	Δ	3	220	52	0,90	0,84	220	3,5
7	Y	4	380	31	0,88	0,78	150	2,8
8	Δ	4	220	42	0,89	0,79	220	3,3
9	Y	2	380	100	0,91	0,89	540	3,1
10	Δ	2	220	120	0,90	0,90	635	3,2
11	Y	3	380	70	0,91	0,84	432	3,0
12	Δ	3	220	90	0,91	0,87	500	3,5
13	Y	4	380	55	0,90	0,79	387	2,8

14	Δ	4	220	70	0,91	0,81	430	4,1
15	Y	4	380	55	0,88	0,77	171	2,2
16	Δ	4	220	70	0,89	0,77	218	2,1
17	Y	4	380	80	0,89	0,77	265	2,3
18	Δ	4	220	95	0,89	0,78	285	2,2
19	Y	4	380	130	0,90	0,80	320	2,6
20	Δ	4	220	160	0,91	0,80	405	2,5
21	Y	2	380	120	0,90	0,89	635	3,2
22	Δ	2	220	100	0,89	0,88	540	3,0
23	Y	3	380	52	0,83	0,84	380	3,4
24	Δ	3	220	38	0,84	0,83	220	3,1
25	Y	3	380	28	0,85	0,83	250	3,3

Таблица 26

Номер группового варианта	1	2	3	4	5
$s_{НОМ}, \%$	2,5	3,5	3	4	4,5

Методические указания и пример расчета

Решение данной задачи рассматривается при следующих исходных данных: $P_{НОМ}=21$ кВт, $U_{НОМ}=220$ В, $\eta_{НОМ}=0,865$, $\cos\varphi_{НОМ}=0,83$, $M_{\max}/M_{НОМ}=3,2$, $U_{2НОМ}=114$ В, $s_{НОМ}=0,025$, $p=3$; обмотка статора соединена звездой. Это решение осуществляется в следующем образом.

Определяются критические скольжения, относящиеся к естественной и второй искусственной характеристикам. Критическое скольжение, относящееся к естественной характеристике,

$$s_{кр} = s_{НОМ} \left(\frac{M_{\max}}{M_{НОМ}} + \sqrt{\left(\frac{M_{\max}}{M_{НОМ}} \right)^2 - 1} \right) = 0,025 \left(3,2 + \sqrt{3,2^2 - 1} \right) = 0,156$$

Критическое скольжение, относящееся ко второй искусственной характеристике, $s_{кр2} = 0,5(s_{кр} + s_{кр1}) = 0,5(0,156 + 1) = 0,578$.

Определяются частота вращения поля статора и номинальная частота

$$\text{вращения ротора: } n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 * 50}{3} = 1000 \text{ об/мин;}$$

$$n = n_1(1 - s_{НОМ}) = 1000(1 - 0,025) = 975 \text{ об/мин;}$$

Определяются номинальный и максимальный моменты на валу:

$$M_{НОМ} = \frac{9550P_{НОМ}}{n_{НОМ}} = \frac{9550 * 21}{975} = 206 \text{ Н}\cdot\text{м;}$$

$$M_{\max} = 3,2M_{\text{НОМ}} = 3,2 * 206 = 658 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Определяются номинальные фазные напряжение и ток статора:

$$U_{\text{ф.НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} = 220 \text{ В};$$

$$I_{\text{ф.НОМ}} = I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{(\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}\eta_{\text{НОМ}}\cos\varphi_{\text{НОМ}})} = \frac{21000}{(1,73 * 380 * 0,865 * 0,83)} = 44 \text{ А};$$

Составляется схема замещения двигателя при номинальном режиме работы (рис. 40) и на основе ее определяются приведенное активное сопротивление ротора R_2'' и индуктивное сопротивление двигателя при опыте

короткого замыкания X_K . Полное сопротивление $Z_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{ф.НОМ}}}{I_{\text{ф.НОМ}}} = \frac{220}{44} = 5 \text{ Ом}.$

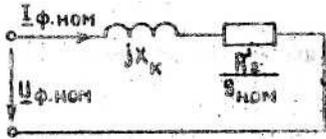


Рис. 40

Полное сопротивление $Z_{\text{НОМ}}$, индуктивное сопротивление X_K и активное сопротивление $R_2''/s_{\text{НОМ}}$ связаны уравнением $Z_{\text{НОМ}}^2 = X_K^2 + \left(\frac{R_2'}{s_{\text{кр}}}\right)^2$. Учитывая то, что для упрощенной схемы замещения $X_K \approx R_2'/s_{\text{кр}}$, получаем:

$$Z_{\text{НОМ}}^2 = \left(\frac{R_2'}{s_{\text{кр}}}\right)^2 + \left(\frac{R_2'}{s_{\text{НОМ}}}\right)^2. \text{ После подстановки числовых значений данное}$$

уравнение принимает вид: $5^2 = \left(\frac{R_2'}{0,156^2}\right)^2 + \left(\frac{R_2'}{0,025}\right)^2$. Решив данное уравнение,

получаем: $R_2' = 0,12 \text{ Ом}$. В связи с этим $X_K = 0,12/0,156 = 0,77 \text{ Ом}$.

Составляется схема замещения двигателя с пусковым реостатом (рис. 41) и на ее основе определяются приведенные сопротивления пусковых резисторов $R_{\text{П1}}$ и $R_{\text{П2}}$. При включении в цепь ротора верх-

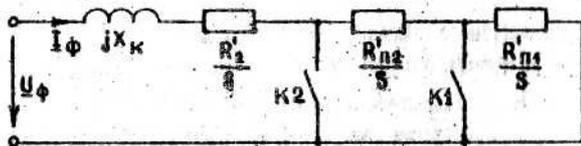


Рис. 41

ней ступени пускового реостата (рис. 39) в схему замещения добавляется резистор $R_{\Pi 2}'/s$ (рис. 41). Данному состоянию схемы соответствует уравнение

$$X_K = \frac{(R_2' + R_{\Pi 2}')}{s_{кр2}}; \quad 0,77^2 = (0,12 + R_{\Pi 2}') * 0,578, \text{ решив которое получаем}$$

$R_{\Pi 2}' = 0,325$ Ом. При включении в цепь ротора обеих ступеней реостата, в схему замещения добавляются два резистора: $R_{\Pi 2}/s$ и $R_{\Pi 1}/s$. Данному состоянию схемы соответствует уравнение:

$$X_K = (R_2' + R_{\Pi 2}' + R_{\Pi 1}') s_{кр1}; \quad 0,77 = (0,12 + 0,325 + R_{\Pi 1}') , \text{ решив которое, получаем } R_{\Pi 1}' = 0,325 \text{ Ом.}$$

Определяются фазное напряжение обмотки ротора $U_{2ф.ном}$, коэффициент трансформации двигателя K и сопротивления пусковых резисторов $R_{\Pi 1}$ и $R_{\Pi 2}$:

$$U_{2ф.ном} = \frac{U_{2ном}}{\sqrt{3}} = \frac{114}{1,73} = 66 \text{ В};$$

$$K = \frac{U_{ф.ном}}{U_{2ном}} = \frac{220}{66} = 1,93; \quad R_{\Pi 1} = R_{\Pi 2} = \frac{R_{\Pi}'}{K^2} = \frac{0,325}{1,93^2} = 0,087 \text{ Ом.}$$

Определяются пусковые токи и моменты для каждой характеристики:

$$I_{\Pi} = \frac{U_{ф.ном}}{\sqrt{R_2'^2 + X_K^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,12^2 + 0,77^2}} = 282 \text{ А};$$

$$I_{\Pi 1} = \frac{U_{ф.ном}}{\sqrt{(R_2' + R_{\Pi 1}')^2 + X_K^2}} = \frac{220}{\sqrt{(0,12 + 0,325 + 0,325)^2 + 0,77^2}} = 202 \text{ А};$$

$$I_{\Pi 2} = \frac{U_{ф.ном}}{\sqrt{(R_2' + R_{\Pi 2}')^2 + X_K^2}} = \frac{220}{\sqrt{(0,12 + 0,325)^2 + 0,77^2}} = 249 \text{ А};$$

$$M_{\Pi} = \frac{2M_{max}}{\frac{1}{s_{кр}} + s_{кр}} = \frac{2 * 658}{\frac{1}{0,156} + 0,156} = 200 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\Pi 2} = \frac{2M_{max}}{\frac{1}{s_{кр2}} + s_{кр2}} = \frac{2 * 658}{\frac{1}{0,578} + 0,578} = 570 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Строятся графики зависимостей $M(s)$ (рис. 42). Графическим путем определяются скольжения $s_{ном1}$ и $s_{ном2}$, которые, будет иметь двигатель, работая согласно характеристикам $M(s)_1$ и $M(s)_2$ с моментом на валу, равным номинальному. При этом получилось: $s_{ном1} = 0,32$; $s_{ном2} = 0,17$.

Определяется частоты вращения $n_{ном1}$, $n_{ном2}$ и токи статора $I_{ном1}$, $I_{ном2}$ соответствующие скольжениям $s_{ном1}$ и $s_{ном2}$:

$$n_{ном1} = n_1(1 - s_{ном1}) = 1000(1 - 0,32) = 680 \text{ об/мин};$$

$$n_{ном2} = n_1(1 - s_{ном2}) = 1000(1 - 0,17) = 830 \text{ об/мин};$$

$$I_{\text{НОМ1}} = \frac{U_{\phi.\text{НОМ}}}{\sqrt{\left(\frac{R'_2 + R'_{\text{П1}} + R'_{\text{П2}}}{s_{\text{НОМ1}}}\right)^2 + X_K^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(\frac{0,12 + 0,325}{0,32}\right)^2 + 0,77^2}} = 87 \text{ А};$$

$$I_{\text{НОМ2}} = \frac{U_{\phi.\text{НОМ}}}{\sqrt{\left(\frac{R'_2 + R'_{\text{П2}}}{s_{\text{НОМ2}}}\right)^2 + X_K^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(\frac{0,12 + 0,325}{0,17}\right)^2 + 0,77^2}} = 80 \text{ А}.$$

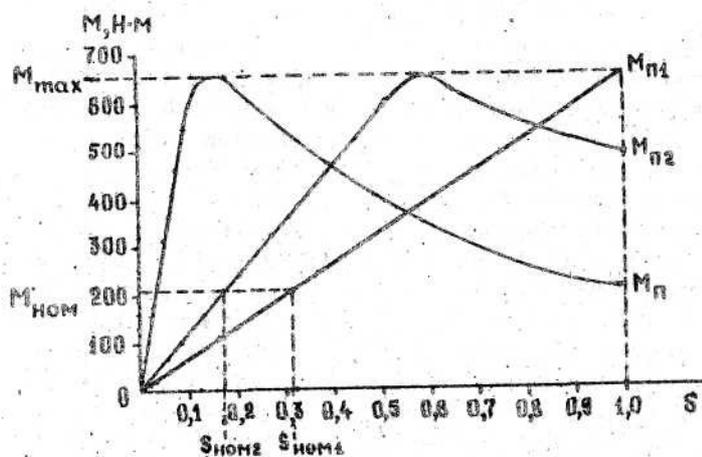


Рис. 42

Для удобства анализа и использования значения, найденных в процессе решения задачи величин приводятся в табл. 27.

Таблица 27

Наименование величин, их обозначения и единицы измерения	Характеристики М и значения величин, относящихся к ним		
	М(s) ₁	М(s) ₂	М(s)
1	2	3	4
Критические скольжения $s_{\text{кр1}}, s_{\text{кр2}}, s_{\text{кр}}$	1	0,578	0,156
Пусковые моменты $M_{\text{П1}}, M_{\text{П2}}, M_{\text{П}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	658	570	200
Пусковые токи $I_{\text{П1}}, I_{\text{П2}}, I_{\text{П}}, \text{А}$	202	249	282
Величины, соответствующие номинальному моменту на валу			
А) скольжения $s_{\text{НОМ1}}, s_{\text{НОМ2}}, s_{\text{НОМ}}$	0,32	0,17	0,025
Б) частоты вращения ротора $n_{\text{НОМ1}}, n_{\text{НОМ2}}, n_{\text{НОМ}}, \text{об/мин}$	680	830	975
В) токи статора $I_{\text{НОМ1}}, I_{\text{НОМ2}}, I_{\text{НОМ}}, \text{А}$	87	80	45,2

Задача 14. Расчет характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

Рассчитать и построить механические характеристики двигателя, указанные в табл. 28. Знак "X" в ней означает, что данный контакт замкнут. Схема электрической цепи двигателя приведена на рис. 43. Исходные данные к расчету приведены в табл. 29 и 30. Этими данными являются: номинальное напряжение двигателя $U_{ном}$, номинальная мощность $P_{ном}$, номинальная частота вращения якоря $n_{ном}$, номинальный коэффициент полезного действия $\eta_{ном}$, сопротивление обмотки якоря $R_{я}$, сопротивление обмотки возбуждения $R_{в}$, кратность пускового момента $M_{п}/M_{ном}$, ток возбуждения $I_{в}$ в процентах от $I_{в,ном}$, поток возбуждения Φ в процентах от $\Phi_{ном}$. Естественная характеристика $n(M)$ получается при номинальном возбуждении; $\Phi = \Phi_{ном}$. Первая реостатная механическая характеристика $n(M)_1$ должна обеспечивать пусковой момент, значение которого указано в табл. 30. Вторая реостатная механическая характеристика $n(M)_2$ должна занимать среднее положение между характеристиками $n(M)$ и $n(M)_1$. Первая полюсная механическая характеристика $n(M)_3$ получается при $\Phi = 0,75 \Phi_{ном}$, а вторая $n(M)_4$ - при $\Phi = 0,5 \Phi_{ном}$. При определении тока возбуждения по заданному магнитному потоку следует пользоваться вебер-амперной характеристикой магнитной цепи двигателя, приведенной в табл. 31. График этой характеристики необходимо представить в данной работе.

При расчетах реакцией якоря следует пренебречь.

Пуск двигателя начинается согласно первой реостатной характеристике, т.е. $M_{п} = M_{п} = 2M_{ном}$.

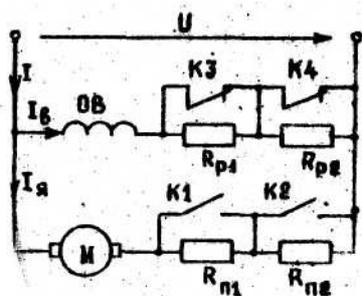


Рис. 43

Таблица 28

Условное обозначение и наименование характеристики	Контакты и их положение			
	K1	K2	K3	K4
n(M) - естественная механическая характеристика	X	X	X	X
n(M) ₁ - первая реостатная механическая характеристика			X	X
n(M) ₂ - вторая реостатная механическая характеристика	X		X	X
n(M) ₃ - первая полюсная механическая характеристика	X	X		X
n(M) ₄ - вторая полюсная механическая характеристика	X	X		

Таблица 29

Номер личного варианта	U _{НОМ} , В	P _{НОМ} , кВт	n _{НОМ} , об/мин	η _{НОМ} , %	R _Я , Ом	R _В , Ом
1	2	3	4	5	6	7
1	110	1,0	3000	77	1,20	220
2	110	1,5	3000	76	0,80	160
3	110	2,2	3000	80	0,48	110
4	110	3,2	3000	78	0,34	80
5	110	4,5	1500	80	0,23	70
6	220	6,0	1500	82	0,62	220
7	220	8,0	3000	83	0,44	110
8	220	11,0	1500	84	0,31	185
9	220	14,0	1500	86	0,21	135
10	220	19,0	1500	84	0,16	110
11	220	3,8	1025	86	1,20	180
12	220	13,5	1225	86	0,21	33
13	115	14,0	1000	82	0,11	50
14	110	34,5	1100	85	0,04	27
15	220	4,3	1025	84	1,16	75
16	110	1,0	1240	85	0,80	210
17	220	5,2	960	83	1,50	150
18	110	4,5	1400	86	0,60	60
19	220	8,1	1600	86	0,94	120
20	220	8,6	1100	87	0,45	110
21	110	1,2	850	85	1,90	200
22	110	2,6	940	84	0,70	80
23	220	3,8	1350	85	0,82	200
24	110	1,1	1450	83	1,40	220
25	220	5,2	1025	86	0,74	258

Таблица 30

Номер группового варианта	1	2	3	4	5
Кратность пускового момента $M_{П}/M_{НОМ}$	2,0	2,4	1,8	2,2	1,6

Таблица 31

Ток возбуждения I_B процентах от $I_{НОМ В}$	0	20	40	60	80	100	120	150
Поток возбуждения Φ в процентах от $\Phi_{НОМ}$	5	45	73	88	95	100	103	107

Методические указания и пример расчета

Решение данной задачи рассматривается при следующих исходных данных: $U_{НОМ}=220$ В; $P_{НОМ}=19$ кВт; $n_{НОМ}=1500$ об/мин; $\eta_{НОМ}=84,5\%$; $R_{Я}=0,16$ Ом; $R_B=110$ В; $M_{П}/M_{НОМ}=2$. Это решение осуществляется в следующем образом.

Определяются величины, относящиеся к естественной характеристике двигателя при номинальном режиме работы, а именно: номинальная мощность, потребляемая двигателем от сети $P_{I_{НОМ}} = \frac{P_{НОМ}}{\eta_{НОМ}} = \frac{19}{0,845} = 22,5$ кВт; номинальный

ток двигателя $I_{НОМ} = \frac{P_{I_{НОМ}}}{U_{НОМ}} = \frac{22500}{220} = 102$ А; номинальный ток возбуждения

$$I_{B.НОМ} = \frac{U_{НОМ}}{R_B} = \frac{220}{110} = 2 \text{ А}; \quad \text{номинальный ток якоря}$$

$I_{Я.НОМ} = I_{НОМ} - I_{B.НОМ} = 102 - 2 = 100$ А; номинальное значение ЭДС

$E_{НОМ} = U_{НОМ} - R_{Я} I_{Я.НОМ} = 220 - 0,16 * 100 = 204$ В; номинальный момент на валу

$$M_{НОМ} = \frac{9550 P_{НОМ}}{n_{НОМ}} = \frac{9550 * 19}{1500} = 121 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Определяются числовые значения величин $C_e \Phi_{НОМ}$, $C_M \Phi_{НОМ}$ и $C_e C_M \Phi_{НОМ}$, которые широко используются как вспомогательные величины при дальнейшем решении задачи. Величина $C_e \Phi_{НОМ}$ определяется из уравнения номинальной

ЭДС: $E_{НОМ} = C_e \Phi_{НОМ} n_{НОМ}$, из которого получаем: $C_e \Phi_{НОМ} = \frac{E_{НОМ}}{n_{НОМ}} = \frac{204}{1500} = 0,136$.

Величина $C_M \Phi_{НОМ}$ определяется из уравнения номинального момента

$M_{НОМ} = C_M \Phi_{НОМ} I_{Я.НОМ}$, из которого получаем: $C_M \Phi_{НОМ} = \frac{M_{НОМ}}{I_{Я.НОМ}} = \frac{121}{100} = 1,21$.

Величина $C_e C_M \Phi_{НОМ}^2 = 0,136 * 1,21 = 0,164$.

Так как характеристики $n(M)$, $n(M)_1$, $n(M)_2$ получаются при одном и том же потоке возбуждения $\Phi_{\text{НОМ}}$, то частоты вращения якоря при холостом ходе двигателя n_x , n_{x1} , n_{x2} , относящиеся к этим характеристикам, оказываются равными. Частота вращения n_x определяется из уравнения естественной механической характеристики при холостом ходе двигателя:

$$n_x = \frac{U_{\text{НОМ}}}{C_e \Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{220}{0,136} = 1617 \text{ об/мин.}$$

График естественной механической характеристики $n(M)$ проходит через точку n_x и точку с координатами $M_{\text{НОМ}}$, $n_{\text{НОМ}}$ (рис. 44).

График первой реостатной механической характеристики $n(M)_1$ проходит через точку n_x и точку $M_{\text{П}}$, так как пуск двигателя начинается согласно этой характеристике: $M_{\text{П}} = 2M_{\text{НОМ}} = 2 * 121 = 242 \text{ Н}\cdot\text{м}$. По этому графику определяется частота вращения якоря $n_{\text{НОМ}1}$ которую будет иметь двигатель, работая согласно данной характеристике с моментом на валу, равным номинальному. Получилось $n_{\text{НОМ}1} = 800 \text{ об/мин}$.

График второй реостатной механической характеристики $n(M)_2$ проходит через точку n_{x2} и по условию задачи занимает среднее положение между характеристиками $n(M)$ и $n(M)_1$. При этом условии частота вращения $n_{\text{НОМ}2}$ которую будет иметь двигатель, работая согласно характеристике $n(M)_2$ с моментом на валу, равным номинальному, определяется как среднее арифметическое от $n_{\text{НОМ}}$ и $n_{\text{НОМ}1}$:

$$n_{\text{НОМ}} = \frac{(n_{\text{НОМ}} + n_{\text{НОМ}1})}{2} = \frac{(1500 + 800)}{2} = 1150 \text{ об/мин.}$$

График первой полюсной механической характеристики $n(M)_3$ проходит через точку n_{x3} и точку с координатами $M_{\text{НОМ}}$; $n_{\text{НОМ}3}$.

Частота вращения якоря n_{x3} , которую будет иметь двигатель, работая на холостом ходу согласно данной характеристике, определяется по формуле

$$n_x = \frac{U_{\text{НОМ}}}{(0,75 C_e \Phi_{\text{НОМ}})} = \frac{220}{(0,75 * 0,136)} = 2157 \text{ об/мин.}$$

Частота вращения якоря $n_{\text{НОМ}3}$, которую будет иметь двигатель, работая согласно данной характеристике с моментом на валу, равным номинальному, определяется из уравнения данной механической характеристики:

$$\begin{aligned} n_{\text{НОМ}3} &= \frac{U_{\text{НОМ}}}{0,75 C_e \Phi_{\text{НОМ}}} - M_{\text{НОМ}} \frac{R_{\text{я}}}{0,75^2 C_e C_M \Phi_{\text{НОМ}}^2} = \\ &= \frac{220}{0,75 * 0,136} - 121 \frac{0,16}{0,56 * 0,164} = 1959 \end{aligned}$$

График второй полюсной механической характеристики $n(M)_4$, проходит через точку n_{x4} и точку с координатами $M_{\text{НОМ}}$; $n_{\text{НОМ}4}$.

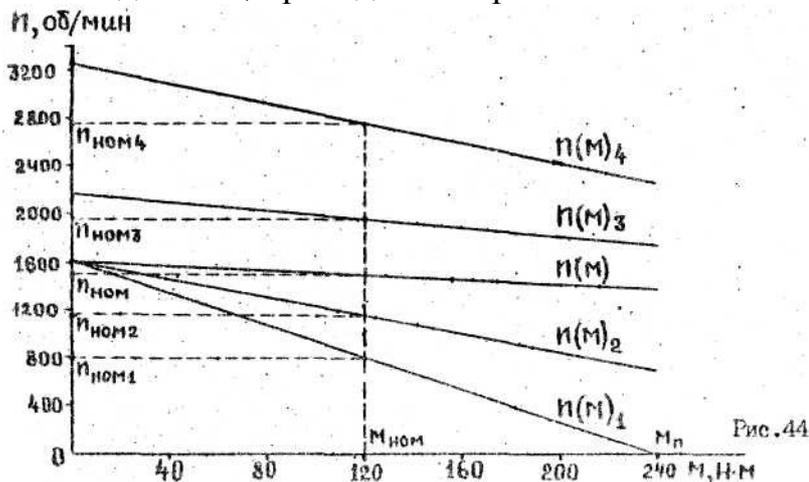
Частота вращения якоря n_{x4} , которую имеет двигатель, работая на холостом ходу согласно данной характеристике, определяется по формуле

$$n_{x4} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{(0,5C_e\Phi_{\text{НОМ}})} = \frac{220}{(0,5 * 0,136)} = 3235 \text{ об/мин.}$$

Частота вращения якоря $n_{\text{НОМ}4}$, которую будет иметь двигатель, работая согласно данной характеристике с моментом на валу, равным номинальному, определяется из уравнения данной механической характеристики:

$$\begin{aligned} n_{\text{НОМ}4} &= \frac{U_{\text{НОМ}}}{0,5C_e\Phi_{\text{НОМ}}} - M_{\text{НОМ}} \frac{R_{\text{я}}}{0,5^2 C_e C_M \Phi_{\text{НОМ}}^2} = \\ &= \frac{220}{0,5 * 0,136} - 121 \frac{0,16}{0,25 * 0,164} = 2763 \end{aligned}$$

Графики механических характеристик, построенные согласно полученным данным, приведены на рис. 44.



Сопротивление пускового резистора $R_{\text{П}2}$ определяется из уравнения второй реостатной механической характеристики двигателя при моменте на валу, равном номинальному:

$$n_{\text{НОМ}2} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{C_e\Phi_{\text{НОМ}}} - M_{\text{НОМ}} \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{П}2}}{C_e C_M \Phi_{\text{НОМ}}^2}; \quad 1150 = 1617 - 121 \frac{0,16 + R_{\text{П}2}}{0,164};$$

$$R_{\text{П}2} = (1617 - 1150) \frac{0,164}{121} - 0,16 = 473 \text{ Ом.}$$

Сопротивление пускового резистора $R_{\text{П}1}$ определяется из уравнения первой реостатной механической характеристики двигателя, при моменте на валу, равном номинальному:

$$n_{\text{НОМ}1} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{C_e\Phi_{\text{НОМ}}} - M_{\text{НОМ}} \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{П}2} + R_{\text{П}1}}{C_e C_M \Phi_{\text{НОМ}}^2};$$

$$800 = 1617 - 121 \frac{0,16 + 0,473 + R_{\text{П}1}}{0,164};$$

$$R_{П2} = (1617 - 800) \frac{0,164}{121} - 0,16 - 473 = 0,474 \text{ Ом.}$$

По данным табл. 31 строится вебер-амперная характеристика двигателя (рис. 45) и посредством ее определяются значения токов возбуждения $I_{В3}$ и $I_{В4}$ в процентах от $I_{В.НОМ}$ при работе двигателя согласно характеристикам $\eta(M)_3$ и $\eta(M)_4$. Они получились равными 44 и 22 % соответственно. Значения этих токов в амперах равны: $I_{В3} = 0,84$; $I_{В4} = 0,44$ А.

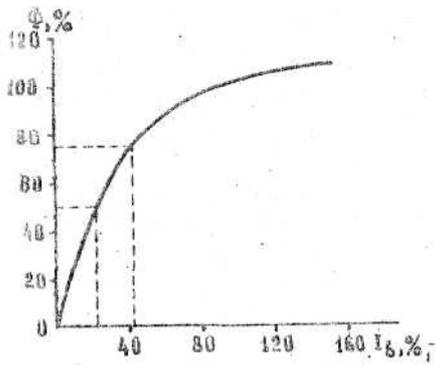


Рис. 45

Сопротивление резистора R_{p1} определяется из уравнения электрического состояния цепи возбуждения, относящегося к первой полюсной характеристике: $U_{НОМ} = I_{В3}(R_B + R_{p1})$, из которого получается:

$$R_{p1} = \frac{U_{НОМ}}{I_{В3}} - R_B = \frac{220}{0,84} - 110 = 152 \text{ Ом.}$$

Сопротивление резистора R_{p2} определяется из уравнения электрического состояния, относящегося ко второй полюсной характеристике:

$$U_{НОМ} = I_{В4}(R_B + R_{p1} + R_{p2}), \text{ из которого получается:}$$

$$R_{p2} = \frac{U_{НОМ}}{I_{В4}} - R_B - R_{p1} = \frac{220}{0,84} - 110 - 152 = 238 \text{ Ом.}$$